

**VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky**

**Řízení teploty spalin za kotlem v EDĚ  
s ohledem na rosný bod spalin**

**Temperature Control of Flue Gas in the Boiler  
for Dětmárovice Power Plant with Regard  
to the Dewpoint**

**Student: Bc. Stanislav Kraina  
Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ladislav Vilimec**

**Ostrava 2012**

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Stanislav Kraina**

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2302T006 Energetické stroje a zařízení

Téma:

Řízení teploty spalin za kotlem v EDĚ s ohledem na rosný bod spalin  
Temperature Control of Flue Gas in the Boiler for Dětmarovice Power  
Plant with Regard to the Dewpoint.

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši kotlů v EDĚ a zajištění provozu nad rosným bodem spalin.
2. Proveďte analýzu možných postupů pro řešení rosného bodu.
3. Vypracujte schéma zapojení zařízení kotle pro řízení teploty spalin včetně schéma regulace.
4. Zpracujte pro EDĚ alternativní návrh pro řízení teploty spalin recirkulací vzduchu .
5. Zpracujte pro EDĚ alternativní návrh pro řízení teploty spalin přehřevem parou.
6. Zpracujte pro EDĚ návrh řízení optimální teploty spalin z hlediska účinnosti kotle a ochrany kotle a partie za kotlem před NT korozi.

Seznam doporučené odborné literatury:

VILIMEC, L. *Stavba kotlů II*. Skripta VŠB-TU Ostrava. 2008. ISBN 978-80-248-1716-3.  
VILIMEC, L. *Řízení a regulace energetických zařízení*. Skripta VŠB - TU Ostrava. 2008.  
ISBN 978-80-248- 853-5.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ladislav Vilimec**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012




  
prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě : 21.5.2012

  
.....  
podpis studenta

## Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 21.5.2012

  
.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Stanislav Kraina

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Padlých hrdinů 219/67a, 736 01 Havířov

## **Poděkování**

Zde, na tomto místě, bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce **doc. Ing. Ladislavu Vilimcovi**, který mě svými odbornými radami v této diplomové práci vedl a ochotně mi pomáhal při řešení jednotlivých problémů souvisejících s touto prací.

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Kraina, S. *Řízení teploty spalin za kotlem v EDĚ s ohledem na rosný bod spalin : diplomová práce*. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta Strojní, Katedra energetiky, 2012, 53s. Vedoucí práce: doc. Ing. Vilimec, L.

Diplomová práce se zabývá úpravou regulace řízení teploty spalin za kotlem s ohledem na rosný bod spalin. Cílem je optimalizace stávající regulace s minimálními náklady. Práce obsahuje popis kotle, problematiku řešení rosného bodu spalin a nové metody přímého měření rosného bodu spalin. Dále je popsána stávající regulace předehřevu spalovacího vzduchu a její alternativní návrhy. Součástí diplomové práce je zkouška odstavení předehřevu spalovacího vzduchu s měřením poklesu teploty spalin za kotlem. V závěru jsou provedeny návrhy optimálního řízení teploty spalin z hlediska účinnosti a ochrany kotle a partie za kotlem před nízkoteplotní korozí a technické zhodnocení navrhovaných úprav.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

Bc. Kraina, S. *Temperature Control of Flue Gas in the Boiler for Dětmárovice Power Plant with Regard to the Dewpoint : Master Thesis*. Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2012, 53p. Thesis head: doc. Ing. Vilimec, L.

This Thesis deals with regulation of temperature control of flue gas behind the boiler with regard to their dewpoint. The aim is to optimize the existing regulation with minimal costs. The essay contains a description of the boiler, the issue of flue gas dewpoint solution and new methods of direct measurement of flue gas dewpoint. Further the current regulation preheating combustion air is described and the alternative proposals. The parts of the thesis is the test of preheating combustion air shutdown with measuring of flue gas temperature decrease behind the boiler. Finally, the concept of optimal control of the flue gas temperature is presented with regard to efficiency and protection of boilers and parts behind boiler for low-temperature corrosion and technical evaluation of the proposed modifications.

## Obsah

<b>Seznam použitých značek a symbolů.....</b>	<b>8</b>
<b>Úvod.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Popis kotle v elektrárně Dětmarovice .....</b>	<b>10</b>
1.1 Okruh voda-pára .....	11
1.2 Okruh palivo a produkty spalování.....	12
1.3 Okruh vzduch – spaliny .....	13
<b>2. Problematika rosného bodu .....</b>	<b>16</b>
2.1 Rosný bod spalin ve vztahu ke spalování uhlí na kotlích v elektrárně Dětmarovice.....	17
2.2 Obecné postupy při řešení problematiky rosného bodu.....	17
2.3 Metoda přímého měření teploty rosného bodu spalin .....	19
<b>3. Regulace přehřevu spalovacího vzduchu v elektrárně Dětmarovice .....</b>	<b>21</b>
3.1 Regulace recirkulací spalovacího vzduchu.....	23
3.2 Regulace přehřevu spalovacího vzduchu v POV .....	24
<b>4. Časový průběh teploty spalin při najíždění a provozu bloku .....</b>	<b>25</b>
4.1 Popis najíždění kotle .....	25
4.2 Časový průběh teplot spalin a spalovacího vzduchu při najíždění v zimě ....	27
4.3 Časový průběh teplot spalin a spalovacího vzduchu při výkonu 130MW <sub>e</sub> v zimě s provedením zkoušky odstavení POV a recirkulace vzduchu .....	33
4.4 Teplota spalin a spalovacího vzduchu při výkonu 200MW v zimě.....	38
<b>5. Alternativní návrh pro řízení teploty spalin recirkulací vzduchu ke stávajícímu provedení.....</b>	<b>40</b>
<b>6. Alternativní návrh pro řízení teploty spalin přehřevem vzduchu v POV ke stávajícímu provedení.....</b>	<b>41</b>
<b>7. Návrh řízení optimální teploty spalin z hlediska účinnosti kotle a ochrany kotle a partie za kotlem před NT korozí .....</b>	<b>44</b>
7.1 Optimální regulace teploty spalin recirkulací horkého vzduchu .....	45
7.2 Optimální regulace teploty spalin přehřevem vzduchu na POV .....	47
7.3 Optimální regulace teploty spalin recirkulací horkého vzduchu podle aktuální hodnoty rosného bodu.....	49
7.4 Optimální regulace teploty spalin přehřevem vzduchu na POV podle aktuální hodnoty rosného bodu.....	51
<b>8. Závěr.....</b>	<b>52</b>
<b>9. Seznam použité literatury.....</b>	<b>53</b>
<b>10. Seznam příloh .....</b>	<b>53</b>

## Seznam použitých značek a symbolů

EDĚ	Elektrárna Dětmarovice
EKO	Ohřívač vody - ekonomizér
EO	Elektrostatické odlučovače
KV	Kouřový ventilátor
LJ	Spalinový ohřívač vzduchu - Ljungström
ML	Kroužkový mlýn
MV	Mlýnský ventilátor
NT	Nízkoteplotní
PG	Parní generátor
PI	Proporcionálně - integrační
POV	Parní ohřívač vzduchu
PSH	Plynové stabilizační hořáky
R	Regulátor
RK	Regulační klapa
RV	Regulační ventil
RVK	Regulační ventil kondenzátu
RVV	Recirkulační vzduchový ventilátor
TG	Turbogenerátor
TXP	Řídicí systém Teleperm XP
VB	Výrobní blok
VT	Vysokotlaká
VV	Vzduchový ventilátor

$c_p$	Měrná tepelná kapacita	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$k$	Součinitel prostupu tepla	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
$Q$	Tepelný výkon	$[\text{W}]$
$S$	Průřez	$[\text{m}^2]$
$t_s$	Teplota spalin	$[^\circ\text{C}]$
$t_{st}$	Teplota stěny	$[^\circ\text{C}]$
$t_v$	Teplota vzduchu	$[^\circ\text{C}]$
$t_{vžž}$	Teplota vzduchu žádaná	$[^\circ\text{C}]$
$t_{vžl}$	Teplota vzduchu - levá větev	$[^\circ\text{C}]$
$t_{vžp}$	Teplota vzduchu - pravá větev	$[^\circ\text{C}]$
$\Delta t_s$	Střední logaritmický teplotní spád	$[^\circ\text{C}]$
$\alpha_s$	Součinitel přestupu tepla na straně spalin	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
$\alpha_v$	Součinitel přestupu tepla na straně vzduchu	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$

CO	Oxid uhelnatý
H <sub>2</sub> O	Voda
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Kyselina sírová
NO <sub>x</sub>	Oxidy dusíku
O <sub>2</sub>	Kyslík
SO <sub>2</sub>	Oxid siřičitý
SO <sub>3</sub>	Oxid sírový



## Úvod

V dnešní době, kdy hovoříme o zvyšování účinnosti energetických zařízení, musíme kromě samotných procesů v kotli sledovat i provoz partie za kotlem. Aby nám toto zařízení dobře sloužilo, nesmí zde docházet zejména k nízkoteplotní korozi, která je vyvolána kondenzací směsi  $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{SO}_4$ . U zařízení za kotlem tedy udržujeme teplotu spalin nad rosným bodem a to pomocí regulace přehřevu spalovacího vzduchu. Současně se musí zajistit i ochrana poslední teplosměnné plochy před nízkoteplotní korozi - v tomto případě je to regenerativní ohřívač vzduchu. V elektrárně Dětmarovice se tato teplota udržuje fixní v celém rozsahu výkonu a musí jí hlídat operátor kotle. Úkolem diplomové práce je regulaci teploty spalin přehřevem spalovacího vzduchu zefektivnit a díky nižší teplotě spalin za kotlem dosáhnout snížení komínové ztráty a vyšší účinnosti.

Dle návrhu nebude teplota spalin regulována jen okamžitou hodnotou teploty spalin před EO, ale do regulace bude vstupovat i teplota plechů na studeném konci LJ, tak jak je tomu u moderních energetických zdrojů. Cílem práce je tedy udržovat teplotu spalin nad rosným bodem v celém rozsahu výkonu bloku, ale ne zbytečně vysokou, která by snižovala účinnost bloku. Alternativní návrhy regulace jsou zpracovány tak, aby došlo jen k minimální úpravě stávajícího zařízení, která nebude vyžadovat vysoké finanční prostředky.

Součástí diplomové práce je zkouška odstavení přehřevu spalovacího vzduchu a sledování jeho vlivu na teplotu spalin za kotlem. Zkouška je provedena při stabilním výkonu, aby nebyla teplota spalin ovlivněna změnou výkonu kotle. V průběhu zkoušky jsou zaznamenány teploty spalovacího vzduchu a spalin a pro srovnání i tyto hodnoty při najíždění a jmenovitém výkonu kotle.

Popsány jsou nové metody přímého měření rosného bodu sondou společnosti SVÚM a.s. Tento způsob měření je využit také při jednom z alternativních návrhů úpravy regulace.

## 1. Popis kotle v elektrárně Dětmarovice

Pro kapitolu 1 byla použita literatura [1]

Kotelna slouží k výrobě páry potřebné pro pohon turbíny na strojovně. V budově kotelny, navazující na budovu strojovny, jsou umístěny čtyři kotle. Kotel jako celek je zavěšený na nosné ocelové konstrukci a dilatuje směrem dolů. Hlavní nosníky stropu jsou usazeny na sloupech, které náleží do ocelové konstrukce budovy kotelny. Pevný bod, vzhledem k dilatování kotle, je na stropě předního tahu, takže kotel dilatuje směrem dolů a směrem k zadnímu tahu. Kotel spolu s turbogenerátorem tvoří jeden výrobní blok.

**Tab.1.** Základní údaje o kotli PG 650

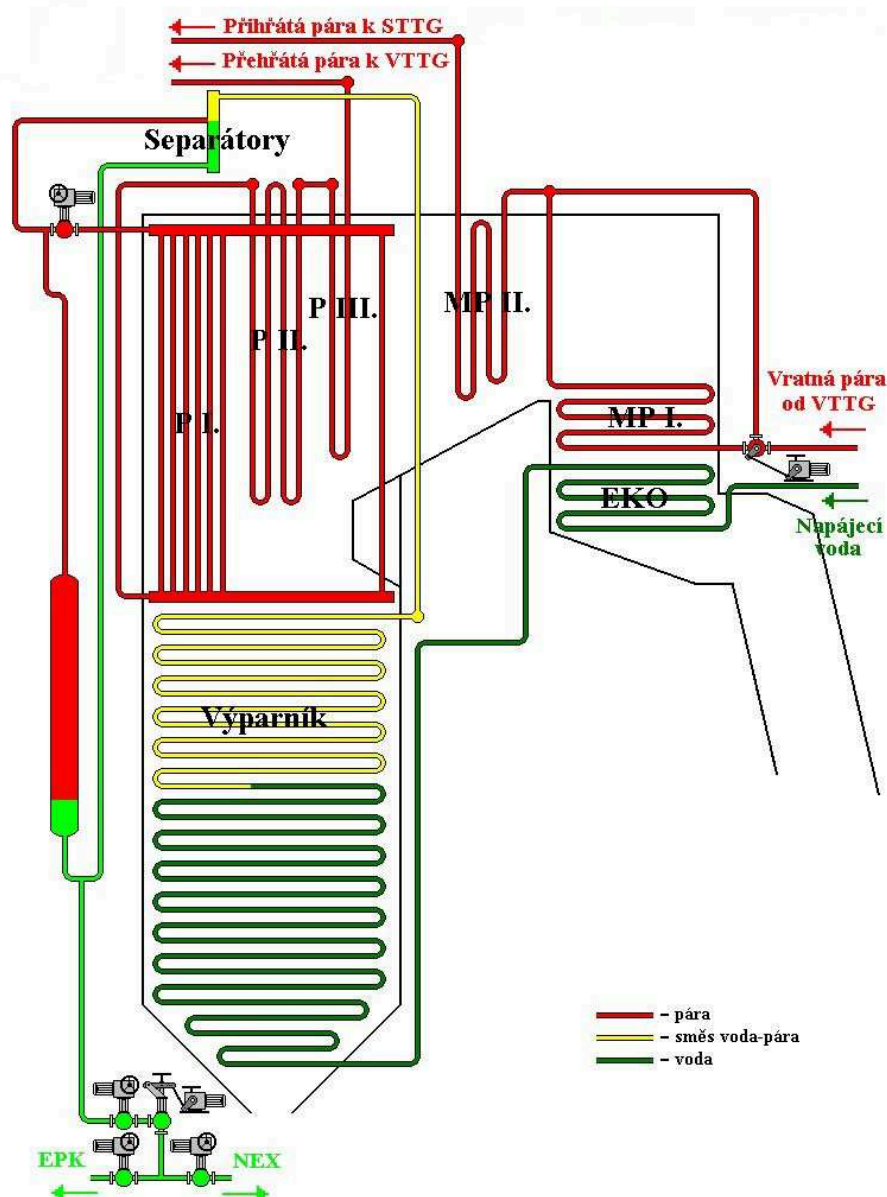
Výkon kotle	<b>650 t/hod</b>
Tlak VT páry	<b>16,5 MPa</b>
Teplota VT páry	<b>540 °C</b>
Jmenovitá teplota napájecí vody	<b>250 °C</b>
Množství mezipáry	<b>550 t/hod</b>
Tlak mezipřihřáté páry	<b>3,72 MPa</b>
Teplota mezipřihřáté páry	<b>540 °C</b>
Teplota vstřikovací vody	<b>165 °C</b>
Účinnost kotle při 650 t/hod	<b>90,4 %</b>
Účinnost kotle při 540 t/hod (ekonomický výkon)	<b>90,8 %</b>
Spalované palivo	<b>Směs černého hruboprachu a granulovaných kalů</b>
Výhřevnost paliva (nejširší pásmo)	<b>21,77 - 25,12 MJ/ kg</b>

Kotel PG 650 t.h<sup>-1</sup> je průtlačný, dvoutahový kotel s granulačním ohništěm. Technologický celek kotle sestává jednak z vlastního kotle (výroba páry) a dále z návazných technologických celků pro výrobu páry nezbytných (úprava a doprava paliva, přísun spalovacího vzduchu, odtah spalin, zajištění napájení kotle vodou, čištění spalin, odtah popele a strusky).

Spalovací komora kotle je obdélníkového průřezu 12×11 m, který je v horní části zúžen nosem vytvořeným z trubek výparníku, přecházejícím do zadní mříže. Práškové hořáky jsou umístěny nad sebou v rozích spalovací komory. Osy hořáků směřují tangencionálně k myšlené kružnici ve středu výparníku.

## 1.1 Okruh voda-pára

Napájecí voda se dodává do kotle z napájecí stanice, která sestává ze dvou elektonapáječek a jedné turbonapáječky. Voda se nasává z nádrže napájecí vody, tlačena je přes vysokotlaké ohříváky a přes napájecí hlavu (zpětná klapka a regulační napájecí ventil) do ekonomizéru kotle. Před vstupem do ekonomizéru je odbočka pro vysokotlaké vstříky, které zajišťují regulaci teploty přehřáté páry na kotli vstřikováním rozprášené vody do proudící přehřáté páry. Středotlaké vstříky pro regulaci teploty přehřáté páry mají zajištěn přívod vody z meziodběru (nižší tlak než na výstupu z napáječky) každé napáječky.



Obr. 1.1-1 Okruh voda - pára v PG

Přehřátá pára vystupuje z kotle na dvou stranách, kde jsou na parovodu na každé straně umístěny impulsní pojistné ventily, a proudí v parovodech podél přední stěny kotle přes směšovací Y kus do vysokotlakého dílu turbíny. Teplota přehřáté páry se reguluje pomocí vysokotlakých vstříků. Z vysokotlakého dílu turbíny se pára vrací zpět do kotle k přihřátí. Přihřátá pára vystupuje z kotle opět na dvou stranách, kde jsou na parovodu na každé straně umístěny impulsní pojistné ventily, a proudí v parovodech podél přední stěny kotle přes směšovací Y kus do středotlakého dílu turbíny. Teplota přihřáté páry se reguluje pomocí středotlakých vstříků a obtokem prvního dílu přehříváku. Ze středotlakého dílu turbíny proudí pára do nízkotlakého dílu a dále do kondenzátoru, kde kondenzuje a kondenzát se dopravuje kondenzátními čerpadly přes regeneraci zpět do nádrže napájecí vody.

## **1.2 Okruh palivo a produkty spalování**

Pro najíždění kotle a stabilizaci spalování během provozu slouží plynové hořáky. Zemní plyn, jako palivo doplňkové, se z vysokého tlaku reguluje v regulační stanici umístěné mimo objekt kotelný na tlak střední a dopravuje se středotlakým plynovodem do kotelný. Na regulačních řadách u každého kotle je dále plyn doregulován na tlak stanovený pro provoz plynových hořáků. Plynové hořáky jsou umístěny v rozích kotle, každý vždy mezi dvěma hořáky práškovými.

Pro běžný provoz kotle jsou určeny práškové nízkoemisní hořáky. Černé uhlí, jako palivo hlavní, se podavači surového uhlí dopravuje ze zásobníků do uhelných mlýnů, kde je semleto na prášek a vzduchem z mlýnských ventilátorů se dopravuje práškovody přes práškové nízkoemisní hořáky do spalovací komory kotle.

Popílek jako produkt spalování uhelného prášku je odlučován v elektrostatických odlučovačích a dopravuje se pneumaticky do zásobních sil popílku a odtud se dále distribuuje podle zjednaného programu. Elektrostatické odlučovače popílku jsou umístěny před kouřovými ventilátory, sestávají ze čtyř samostatných větví, každá větev pak má tři sekce.

Struska jako spečený produkt spalování uhelného prášku se v drtičích strusky, které jsou umístěné pod výsypkou kotle, drtí a vynáší se na struskové pásy. Těmi se dopravuje do zásobníku strusky a je dále distribuována.

### 1.3 Okruh vzduch – spaliny

Spalovací vzduch řízeně dodávaný do kotle se dopravuje vzduchovými ventilátory a je rozdělen na primární, sekundární a terciální. Primární vzduch se odbírá z celkového vzduchu a mlýnským ventilátorem se dopravuje do uhelného mlýna, odkud vynáší semletý uhelný prášek. Tato směs proudí práškovody do práškových hořáků. Primární vzduch je nosným médiem semletého uhelného prášku. Sekundární vzduch vstupuje přes regulační žaluziové klapky do práškových hořáků, kde se v ústí hořáků pomocí víříče mísí se směsí uhelného prášku a primárního vzduchu. Spalování uhelného prášku v oblasti hořáků probíhá s řízeným nedostatkem vzduchu - jedná se o takzvaný nízkoemisní spalovací systém. Chybějící množství vzduchu potřebné k dokonalému spálení (dohoření prášku) se dodává do kotle jako vzduch terciální - dohořivací, přes čtyři samostatné vzduchové trysky OFA umístěné v rozích kotle nad hořáky.

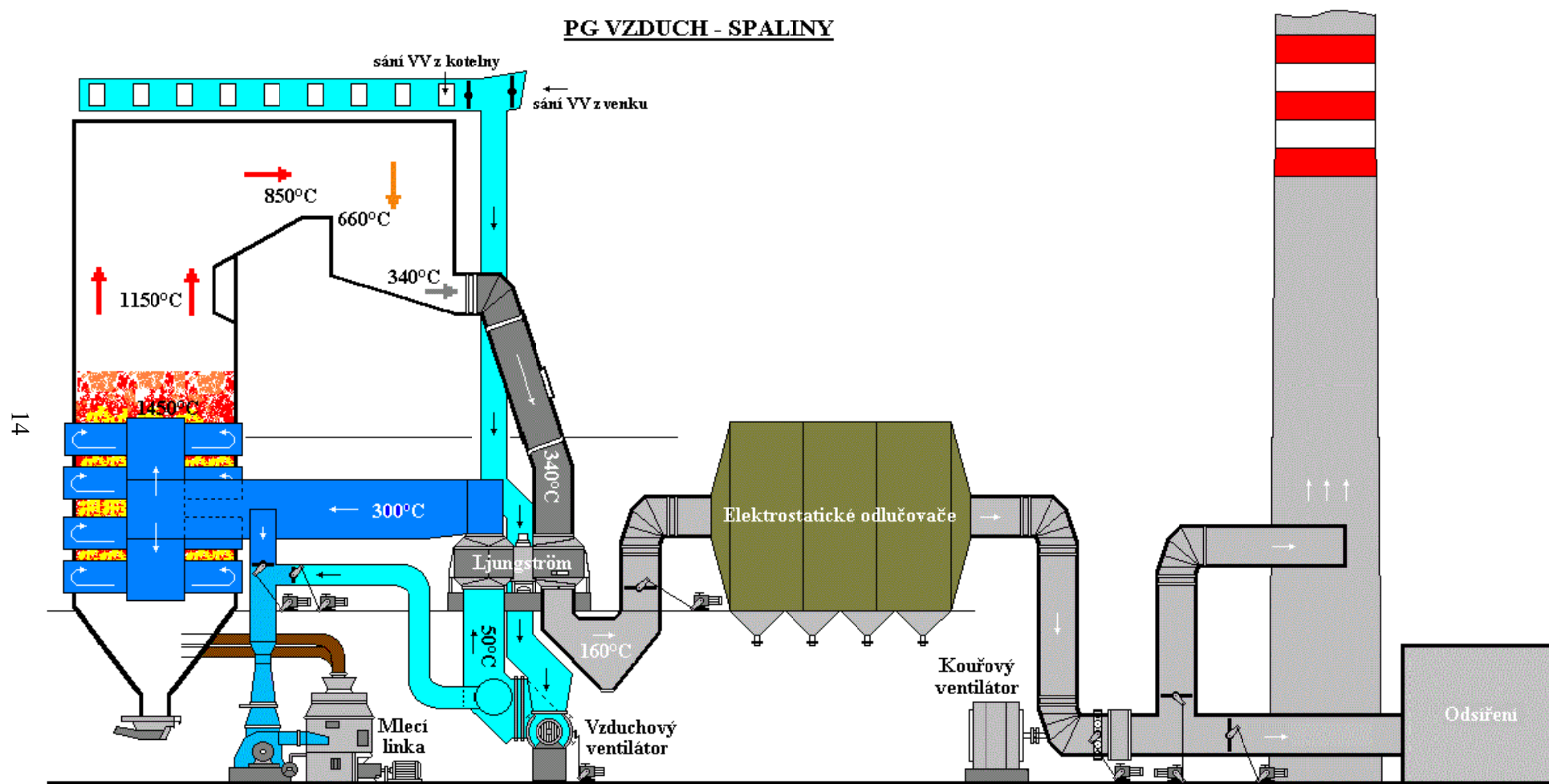
Jako součást spalovacího vzduchu vstupuje do kotle ještě vzduch chladicí, který je nutný ke chlazení neprovozovaných plynových hořáků, ke chlazení snímačů plamene, kamer a radiometrů.

Dále vstupuje do kotle vzduch falešný - neřízený, který je přisáván netěsnostmi na spalovací komoře a spalínovém traktu.

Nasávací potrubí studeného vzduchu je umístěno pod střechou kotelny. Na horní části jsou umístěny klapky, kterými je možno měnit nasávací místo z kotelny nebo z venku. Otvory v nasávacím potrubí jsou zvoleny tak, aby bylo zajištěno větrání horkých míst kotelny v letním období.

Nasávaný vzduch se vede přes tlumiče hluku do sání vzduchových ventilátorů. Z výtlaků vzduchových ventilátorů se studený vzduch vede do parního ohříváku vzduchu. Za parním ohřívákem je provedena odbočka studeného vzduchu do mlýnů. Hlavní část vzduchu prochází přes regenerativní ohřívák vzduchu typu Ljungström k práškovým hořákům a k tryskám dohořivacího vzduchu OFA.

Pro prohřev Ljungströmů při najíždění kotle, a pro možnost ovlivnění teploty vzduchu před LJ za provozu kotle, je za Ljungströmy vyvedeno recirkulační potrubí teplého vzduchu, kterým proudí vzduch přes regulační klapky zpět do sacího potrubí před tlumičem hluku v sání vzduchových ventilátorů.



Obr. 1.3-1 Schéma Vzduch - Spaliny

Před hořáky je z hlavního vzduchovodu přes oddělovací klapky vyvedeno potrubí horkého vzduchu, které je dále spojeno v jeden vzduchovod rozložený po šířce kotelny. Z tohoto vzduchovodu jsou provedeny odbočky do sání mlýnských ventilátorů mlecích linek 1 a 2 každého kotle. Toto provedení zajišťuje možnost použití horkého vzduchu z provozovaného kotle pro najíždění první mlecí linky najížděného kotle.

Před hořáky je dále z hlavního vzduchovodu vyvedeno potrubí horkého vzduchu k sušení uhlí ve mlýně jako vstupní potrubí sání mlýnského ventilátoru (mlecí linka 1 a 2 na levé straně kotle, mlecí linka 3 a 4 na pravé straně kotle). K zajištění regulace teploty sušícího vzduchu do mlýna je do tohoto potrubí zaústěna odbočka studeného vzduchu odebraného za parním ohřívákem. Množství vzduchu (teplého i studeného) se reguluje regulačními klapkami mlýnských ventilátorů.

Za odbočkou teplého vzduchu pro mlýny jsou z hlavního potrubí vyvedeny kanály horkého dohořivacího vzduchu pro OFA trysky (jeden na každé straně kotle), které se rozdělují na obou stranách kotle vždy na dva rohy. Před hubicemi OFA vzduchu jsou vřazeny klapky, které regulují požadované množství vzduchu do hubic v závislosti na okamžitém výkonu kotle.

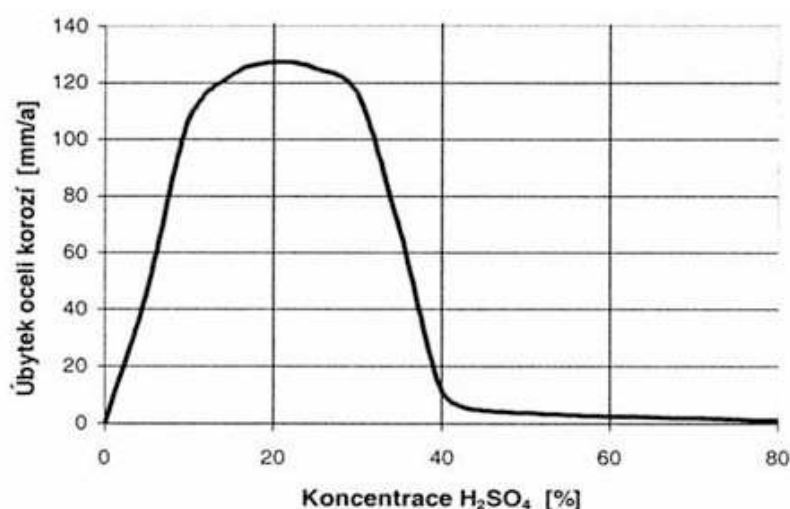
Kouřové plyny se ze zadního tahu kotle odsávají přes ohříváky vzduchu Ljungström. Pod Ljungströmy jsou popelové výsypky pro gravitační odloučení hrubé frakce popele. Ve výsypkách je provedeno propojení obou větví kouřových kanálů s možností jejich propojení nebo oddělení pomocí klapky. Za ohříváky vzduchu jsou spaliny rozděleny do čtyř větví, do každé větve toku spalin jsou zařazeny elektrostatické odlučovače popílku typ ZVVZ Lurgi (čtyři větve, každá tři sekce). Za těmito odlučovači se spaliny opět slučují do dvou větví, v nichž jsou umístěny kouřové ventilátory. Před každým KV, tzn. na obou větvích, je umístěno měřicí místo pro měření koncentrací tuhých znečišťujících látek (prachu), před vždy levým KV je měřicí místo pro měření plynných škodlivin ve spalinách ( $\text{SO}_2 + \text{NO}_x + \text{CO}$ ), dále je zde měřena koncentrace  $\text{O}_2$  pro přepočet koncentrací na normální stavové podmínky plynu. Dále se spaliny slučují do jediné větve a vstupují do původního komína nebo do odsiřovacích jednotek, což zajišťuje soustava kouřových klap.

## 2. Problematika rosného bodu

Pro kapitolu 2 byla použita literatura [2] a [3]

Rosný bod je definován jako teplota, při které dochází ke kondenzaci směsi par  $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4$  obsažených ve spalinách na povrchu výhřevných ploch, stěn tahu kotle nebo kouřovodů. Spalováním fosilních paliv obsahující síru dochází při její oxidaci ke vzniku  $\text{SO}_2$ . Ke tvorbě  $\text{SO}_3$  dochází až při ochlazení spalin pod  $600^\circ\text{C}$ , v závislosti na množství přebývajících spalovacího vzduchu. Z  $\text{SO}_3$  a vodních par při teplotách spalin pod  $200^\circ\text{C}$  vzniká plynná  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Při dalším ochlazení spalin plynná  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a vodní pára kondenzuje a vytváří roztok  $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4$ , který způsobuje korozi všech částí s nižší teplotou než je rosný bod této směsi. Vzniklý kondenzát působí agresivně ve styku s ocelí, ale i se zdivem, betonem a izolací. Teplota rosného bodu závisí kromě obsahu síry v palivu i na hodnotě součinitele přebytku vzduchu a na parciálním tlaku vodní páry.

Hodnotu rosného bodu zvyšuje obsah  $\text{SO}_3$ , obsah  $\text{SO}_2$  ve spalinách přímo na hodnotu rosného bodu nemá vliv. Součinitel konverze (další oxidace  $\text{SO}_2$ ) se udává pro práškové ohniště 1 až 2 %, pro roštová ohniště 4% i více.



**Obr. 2-1** Závislost koncentrace  $\text{H}_2\text{SO}_4$  na úbytku oceli koroze

Intenzita koroze při dosažení rosného bodu roztoku  $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4$  je malá z důvodu malého množství kondenzátu. Při poklesu teploty stěny pod teplotu rosného bodu o asi 20 až  $40^\circ\text{C}$  nastává první korozní maximum, vzniká již značné množství kondenzátu s nebezpečnou koncentrací  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Intenzita koroze závisí kromě množství kondenzátu i na koncentraci  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , takže druhé korozní maximum je v oblasti teplot kondenzace páry  $\text{H}_2\text{O}$  (okolo  $40^\circ\text{C}$ ), kdy je koncentrace kyseliny asi 20 až 40%. K největší korozi dochází při najíždění a odstavování.

Pokud tedy chceme zabránit vzniku nízkoteplotní koroze, musíme teplotu stěn u zařízení za kotlem udržovat na hodnotě větší než je rosný bod spalin.



## **2.1 Rosný bod spalin ve vztahu ke spalování uhlí na kotlích v elektrárně Dětmarovice**

Hodnota rosného bodu určuje teplotu spalin na výstupu z kotle (za LJ, tato je vázána na teplotu za EO, za KV, před odsířením) a tím přímo ovlivňuje hodnotu komínové ztráty a účinnosti kotle.

Poklesu teploty spalin pod rosný bod při provozu v regulačním rozsahu, při snížených výkonech i při najíždění se lze vyhnout přehříváním spalovacího vzduchu.

V roce 2004 bylo provedeno pracovníky VŠB-TU měření rosného bodu za odsířením při stanovení obsahu  $O_2$ ,  $SO_2$ , a  $SO_3$ . Změřený rosný bod ve spalinách VB EDĚ se pohybuje v rozmezí [4]:

při výkonu 100 MW <sub>e</sub>	60,2 °C
při výkonu 130 MW <sub>e</sub>	66 °C
při výkonu 200 MW <sub>e</sub>	68 °C

V letech 95÷97 provedli měření hodnoty rosného bodu ve stejném místě při použití sondy LAND i pracovníci Slezské polytechniky Gliwice. Specialisté z Gliwic uvádějí hodnotu rosného bodu v EDĚ na úrovni 53 °C a méně.

Toto měření je zajímavé z hlediska posouzení koroze kouřovodu a KV za odsířením, ale z hlediska ochrany kotle je irelevantní.

## **2.2 Obecné postupy při řešení problematiky rosného bodu**

Teplotu stěn u ohrožených zařízení kotle a partie za kotlem musíme udržovat na hodnotě vyšší, než je rosný bod spalin. Tuto teplotu stanovíme pro různé provedení kotle následně:

**a)** Poslední teplosměnnou plochou kotle je ohřívák vody – zde záleží na teplotě napájecí vody do kotle, teplota stěny trubky je cca o 5 °C vyšší než teplota napájecí vody. Pro zvýšení teploty stěny ohříváku vody se použije přehřev napájecí vody před vstupem do ekonomického ohříváku. Přehřev se provede tak, že část vody před ohřívákem se odebere (trojcestný ventil) a ohřeje se ve výměníku v bubnu kotle na takovou teplotu, aby voda po smíšení před vstupem do ekonomického ohříváku měla teplotu vyšší než rosný bod.

b) Poslední teplosměnnou plochou je trubkový spalínový ohřívač vzduchu – teplotu stěny lze určit dle vztahu[7]:

$$t_{st} = \frac{t_s \cdot \alpha_s + t_v \cdot \alpha_v}{\alpha_s + \alpha_v} \cong \frac{t_s + t_v}{2} \quad (2-1)$$

$t_s$  a  $t_v$  – teplota spalin a teplota vzduchu [°C]

$\alpha_s$  a  $\alpha_v$  – součinitelé přestupu tepla konvekcí na straně spalin a vzduchu [W/(m<sup>2</sup>K)]

c) Poslední teplosměnnou plochou je regenerativní spalínový ohřívač vzduchu – teplotu stěny lze určit dle vztahu:

$$t_{st} = \frac{X_s \cdot \alpha_s \cdot t_s + X_v \cdot \alpha_v \cdot t_v}{X_s \cdot \alpha_s + X_v \cdot \alpha_v} \quad (2-2)$$

$\alpha_s$  a  $\alpha_v$  – součinitelé přestupu tepla ze spalin do plechů a z plechů [W/(m<sup>2</sup>K)]

$X_s$  a  $X_v$  – poměrné velikosti spalínové a vzduchové části ohřívače

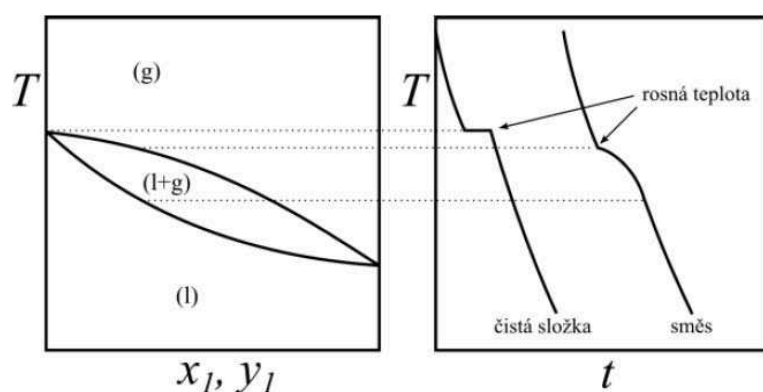
$t_s$  – výstupní teplota spalin ze spalínového segmentu [°C]

$t_v$  – vstupní teplota vzduchu do vzduchového segmentu [°C]

U ohřívače vzduchu se musí teplota vzduchu zvýšit na takovou hodnotu, aby teplota stěny studeného konce ohřívače vzduchu byla vyšší než rosný bod. Předehřev se provede buď parou z odběru turbíny, což je sice jednoduché řešení, ale je neekonomické, protože se snižuje elektrický výkon, nebo se použije recirkulace spalovacího vzduchu zpět do sání VV. Pro regulaci předehřevu vzduchu parou lze použít změnu tlaku vstupující páry (mění se logaritmický teplotní spád na výměníku - použitelný rozsah regulace je malý), nebo se reguluje tepelný výkon výměníku změnou jeho plochy, tedy změnou výšky hladiny kondenzátu ve výměníku. Regulační rozsah je 0 až 100%.

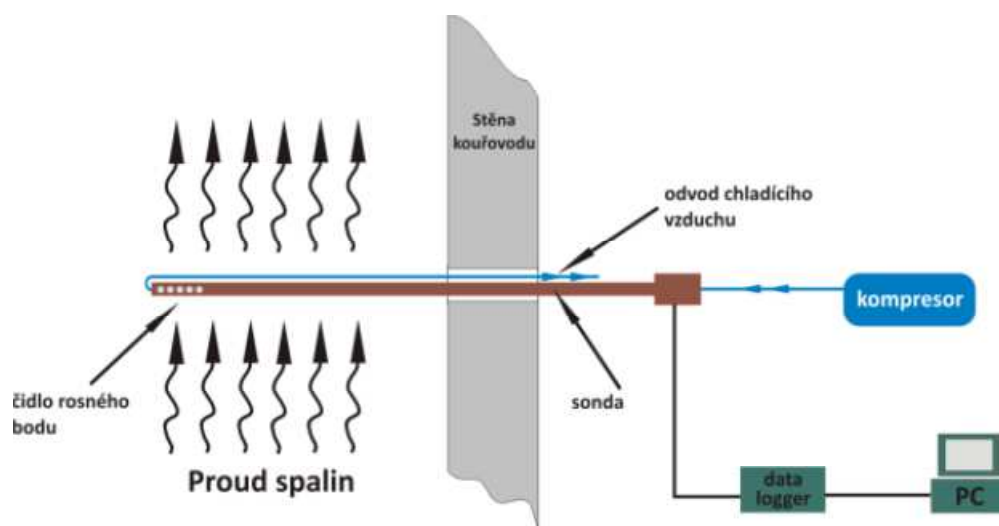
## 2.3 Metoda přímého měření teploty rosného bodu spalín

Pro účel přímého měření teploty rosného bodu ve spalínách byla ve Výzkumném a testovacím centru materiálů SVÚM a.s. vyvinuta metodika, jejíž základem měření je sonda, která se zasouvá přímo do kotle či kouřovodu reálného zařízení. Tento snímač umožňuje on-line provozní měření rosného bodu. Principem měření je řízené ochlazování měrného čidla stlačeným vzduchem či vodní mlhou, čímž se v určitém okamžiku dosáhne kondenzace a ovlhčení čidla. Měrné čidlo se skládá z elektrod oddělených membránou a termočlánku. Termočlánkem je zaznamenávána ochlazovací křivka, a na elektrodách se po ovlhčení membrány objeví elektrické napětí. Během měření je sonda konstantně ochlazována. Termočlánkem je snímána ochlazovací křivka, která má nad rosnou teplotou ustálený průběh. Na obrázku 2.3-1 je pro ilustraci znázorněn izobarický fázový diagram dvousložkového systému s neomezenou mísitelností kapalné fáze spolu s idealizovanými ochlazovacími křivkami. Jednak jde o ochlazovací křivku čisté složky, kde se kondenzace projevuje izotermickou prodlevou, jednak je zde ilustrována ochlazovací křivka směsi určitého složení. Dosažení rosné teploty je indikováno zlomem na ochlazovací křivce z ustáleného hladkého průběhu. Zlomy na křivkách jsou způsobeny uvolněním entalpie fázové přeměny. Obdobným způsobem jsou interpretovány ochlazovací křivky naměřené v reálných spalínách. Rozhodující je poloha zlomu na křivce ustáleného chladnutí, která odpovídá rosné teplotě. Další vývoj tvaru křivky závisí na mnoha dalších faktorech (složení a množství vznikajícího kondenzátu, odtok vzniklých kapek, atd.) a pro vyhodnocení není důležitý.



**Obr. 2.3-1** Izobarický fázový diagram dvousložkového systému

Zároveň dochází k růstu elektrického napětí na elektrodách vlivem ovlhčení dielektrika mezi nimi. Tento napěťový signál je podpůrný, slouží jako jednoznačný důkaz probíhající kondenzace. Měření je opakováno několikrát s různými ochlazovacími rychlostmi a výsledek je postupně zpřesňován. Ochlazovací rychlost je vhodné nastavit co nejnižší, aby se během kondenzace vytvořily na čidle pokud možno rovnovážné podmínky. Výhodou této metody je její jednoduchost při zajištění vysoké přesnosti. Není třeba provádět chemické analýzy spalin, ani používat náročné vyhřívané vzorkovací sondy. Měření je prováděno za reálných podmínek (teplota, tlak, aktuální proudění spalin, usazování hygroskopických solí,...). Sonda je vyrobena výhradně z korozivzdorných a keramických materiálů, tím je zajištěna dostatečná životnost.[5]



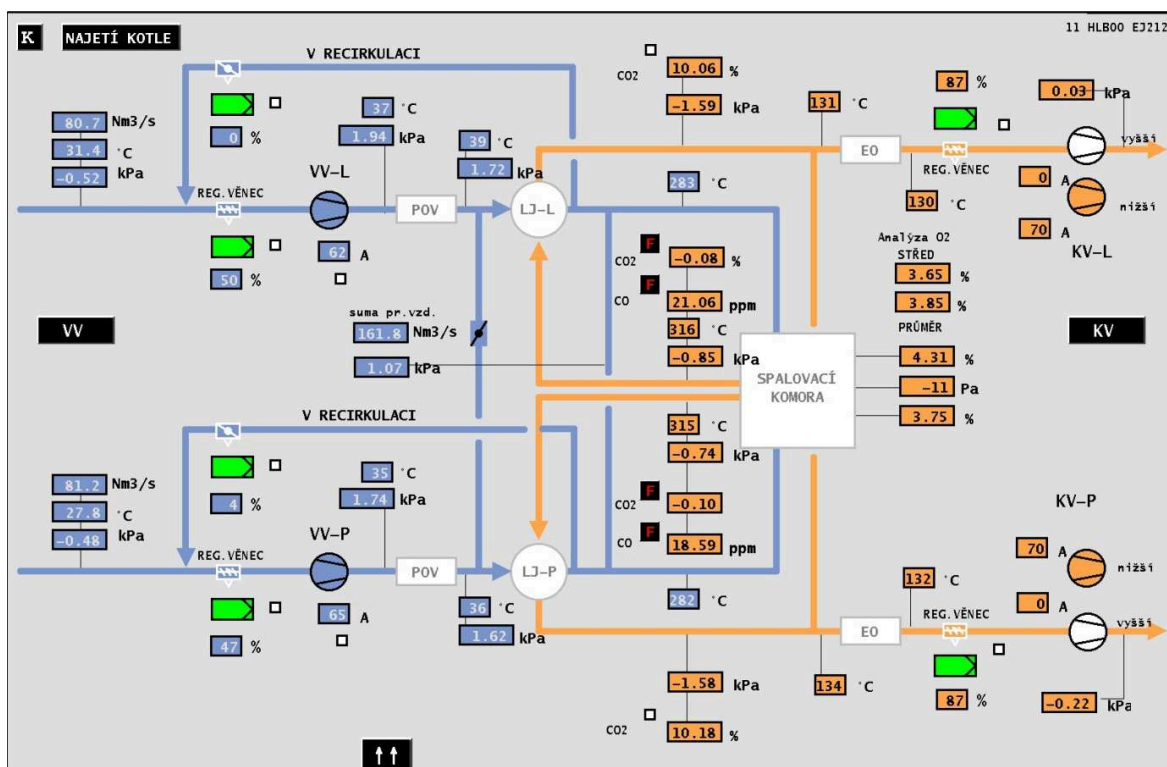
**Obr. 2.3-2** *Přímé měření teploty rosného bodu*

Čidlo bylo testováno i při měření, která prováděli pracovníci společnosti VÍTKOVICE POWER ENGINEERING a.s. v rámci výzkumu korozní odolnosti tlakového systému kotlů ve spalovnách komunálního odpadu. [6]

### 3. Regulace přehřevu spalovacího vzduchu v elektrárně Dětmarovice

Pro kapitolu 3 byla použita literatura [1]

Přehřev spalovacího vzduchu se v elektrárně Dětmarovice provádí parou v POV i recirkulací horkého vzduchu z výstupu LJ do sání VV.

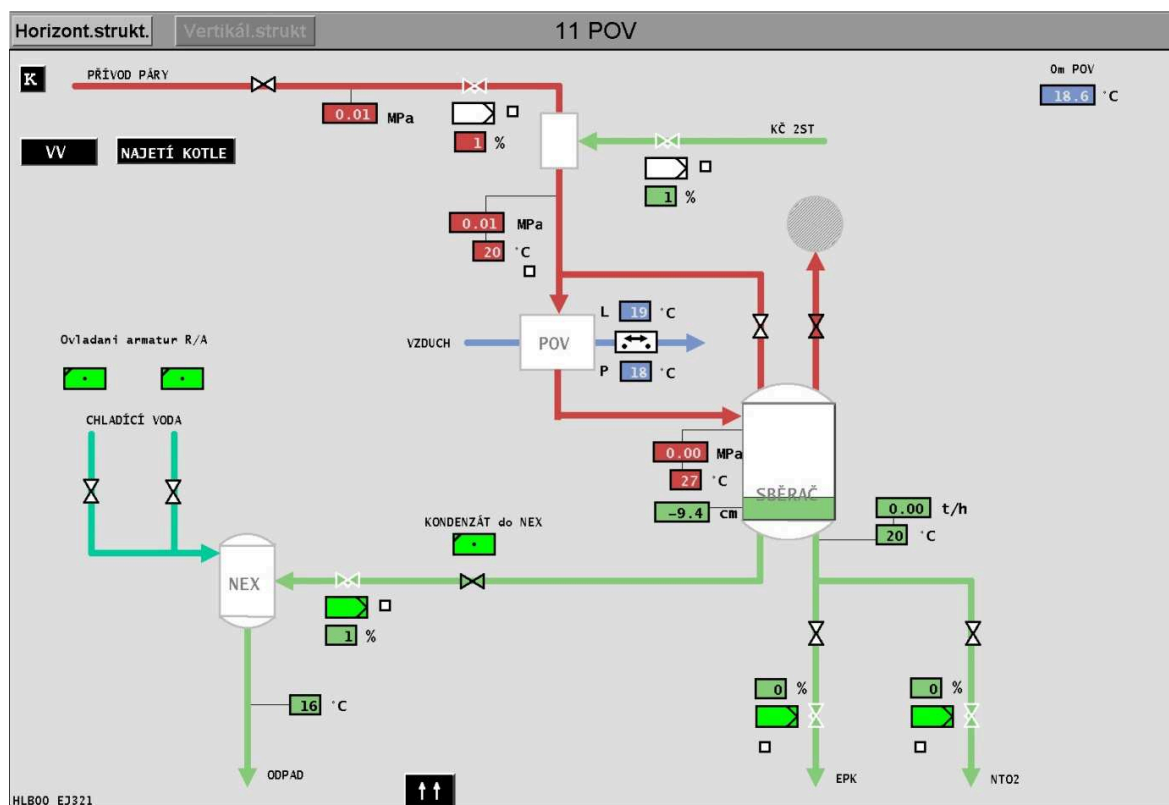


Obr. 3-1 Technologické schéma Vzduch - Spaliny

POV se provozuje tak, že ohřívá vzduch před LJ (za POV) na žádanou teplotu. Při konstantní zadané teplotě vzduchu za POV je množství páry (tepla) potřebné pro ohřev přímo úměrné množství vzduchu, tedy výkonu kotle, a teplotě vzduchu před POV. Změnu množství páry zajišťuje regulační ventil na přívodním potrubí páry k POV. Pára se odebrává buď z 5. odběru TG nebo z parní sběrný.

Teplota vzduchu před LJ se dále udržuje pomocí recirkulačních klapek, které zajišťují částečnou recirkulaci vzduchu ohřátého v LJ do sání VV. Tato možnost se využívá jak při najíždění kotle, kdy se recirkulací vzduchu a současným provozem POV prohřívá kov LJ, tak i při výkonovém režimu kotle, kdy se recirkulací udržuje teplota vzduchu před LJ na hodnotě, která zajistí nepodkročení rosného bodu v zadních částech kotle, zejména elektroodlučovačích a kouřovodech za KV. Zvyšováním teploty vzduchu před LJ se zvyšuje teplota spalin za LJ. Nestačí-li při provozu kotle k dosažení požadované teploty vzduchu před LJ recirkulace horkého vzduchu, přistoupí se k regulaci pomocí POV.

Kondenzát vzniklý v POV se vrací do sběrné nádrže kondenzátu. Regulace hladiny ve sběrači kondenzátu udržuje při všech provozních stavech hladinu na požadované úrovni pomocí regulačního ventilu, aby se pro ohřátí vzduchu využilo celé kondenzační teplo odebírané páry. Z důvodu zamezení koroze tělesa LJ se udržuje při najíždění i při provozu součtová teplota vzduchu vstupujícího do LJ a vystupujících spalin min. 160 °C. Při všech provozních režimech musí být v POV udržován přetlak. Podtlakový provoz není dovolen.



**obr 3-2** *Technologické schéma parního ohříváku vzduchu*

### 3.1 Regulace recirkulací spalovacího vzduchu

Název obvodu: Regulace teploty recirkulací vzduchu před POV

Analogové vstupní signály z technologie:

- Teplota vzduchu za VV-L ( $t_{VZ-L}$ )
- Teplota vzduchu za VV-P ( $t_{VZ-P}$ )

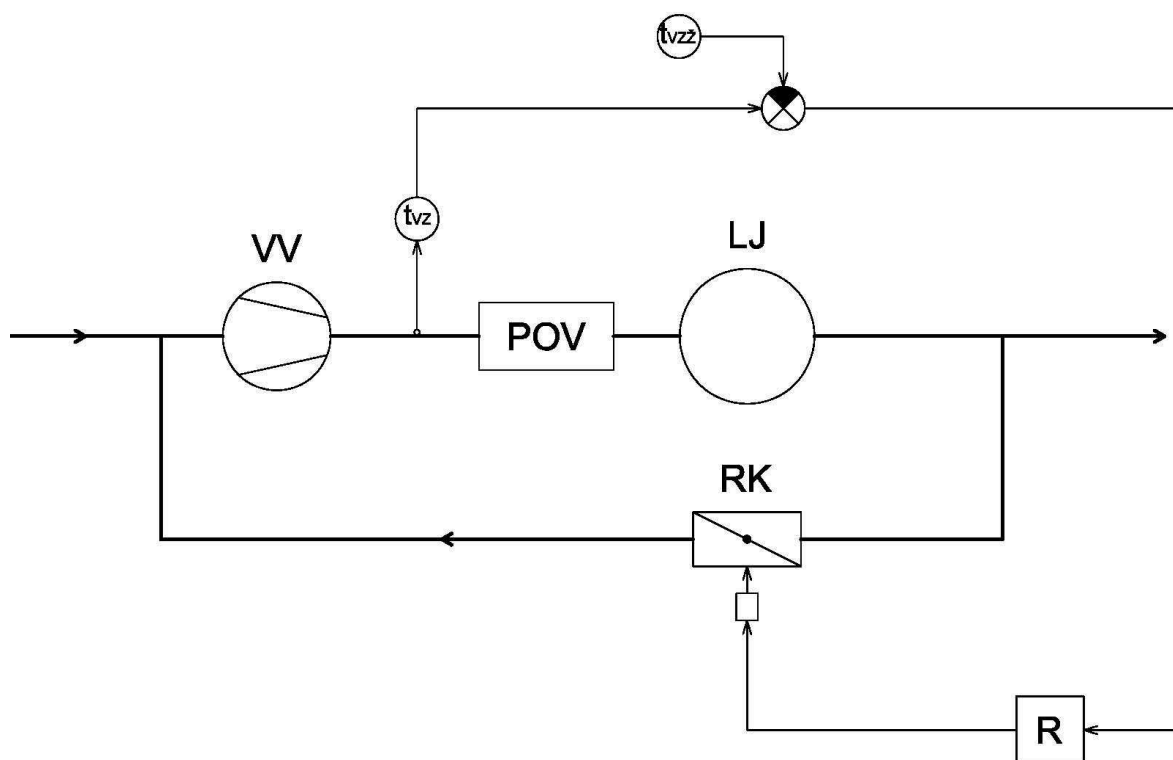
Akční orgány:

- RK recirkulace vzduchu před VV - L
- RK recirkulace vzduchu před VV - P

Popis:

Regulace obou RK se provádí samostatnými PI regulátory na pevnou žádanou hodnotu ( $t_{VZ}$ ). Změna proporcionální složky regulátoru se mění nelineárně podle polohy akčního orgánu. Ruční řízení akčních orgánů RK je možné individuálně. Existuje i možnost automatického řízení každé samostatně.

Maximální z teplot vzduchu pravé a levé strany se reguluje PI regulátorem na žádanou hodnotu zadanou operátorem. Změna proporcionální složky regulátoru se provádí nelineárně podle polohy akčního orgánu.



**Obr.3.1-1** Regulace teploty recirkulací vzduchu před POV

### 3.2 Regulace přehřevu spalovacího vzduchu v POV

Název obvodu: Regulace teploty vzduchu za POV

Analogové vstupní signály z technologie:

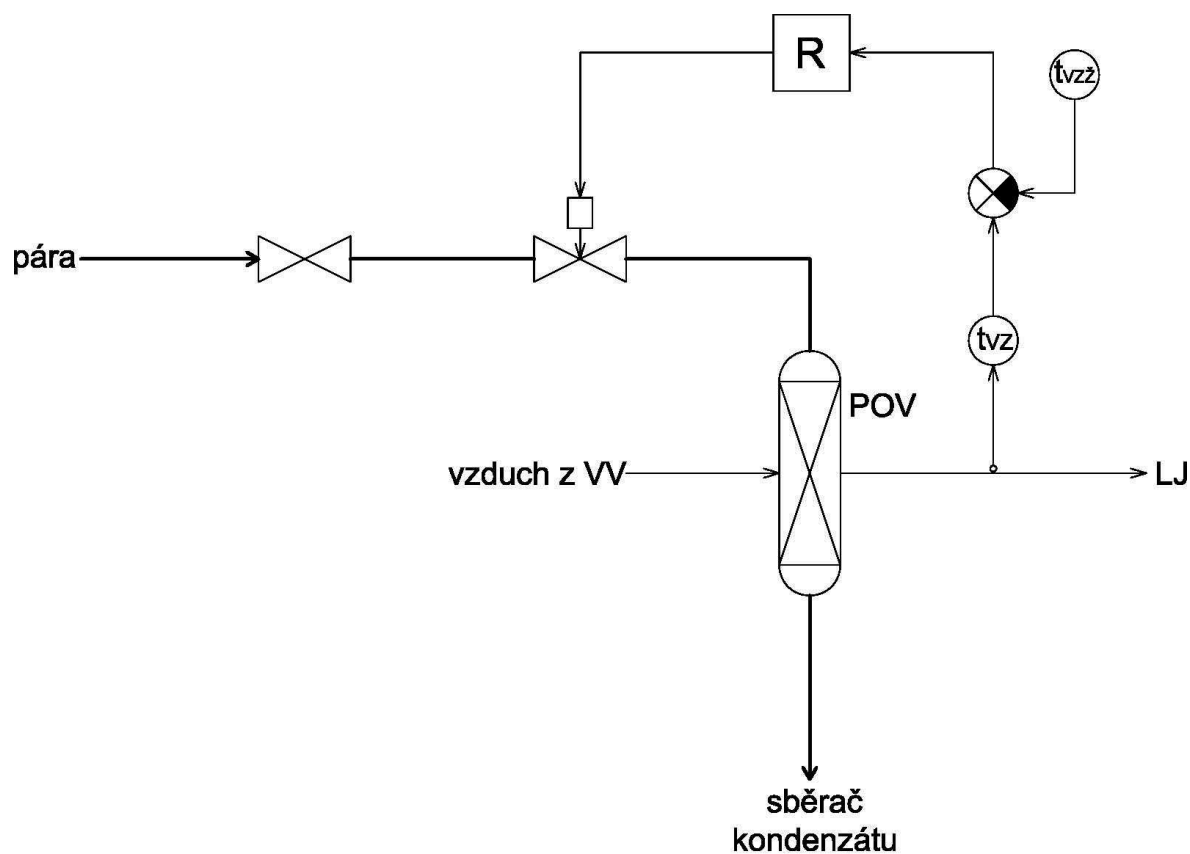
- Teplota vzduchu před LJ-L ( $t_{VZ-L}$ )
- Teplota vzduchu před LJ-P ( $t_{VZ-P}$ )

Akční orgány:

- RV páry do POV

Popis:

Maximální z teplot vzduchu pravé a levé strany se reguluje PI regulátorem na žádanou hodnotu ( $t_{VZ}$ ) zadanou operátorem. Změna proporcionální složky regulátoru se provádí nelineárně podle polohy akčního orgánu.



Obr.3.2-1 Regulace teploty vzduchu za POV



## 4. Časový průběh teploty spalin při najíždění a provozu bloku

Pro stanovení optimální regulace teploty spalin za kotlem byly odečteny z TXP následující hodnoty teplot, tlaků a množství při najíždění a výkonech 130MW<sub>e</sub> a 200MW<sub>e</sub>. Toto bylo provedeno v zimním provozu, kdy se více používá přehřev spalovacího vzduchu (sání VV z venku). V letním provozu jsou z důvodu větrání horkých míst kotelní sání VV provedena z prostoru kotelní a tedy není nutno přehřívát spalovací vzduch, nebo jen málo z ohledem na teplotu spalin za kotlem.

### 4.1 Popis najíždění kotle

Najíždění kotle se dělí do několika fází, kde přechod mezi jednotlivými fázemi je vždy charakterizován změnou režimu kotle, změnou požadavků na parametry výstupní páry a na výkon kotle:

- fáze první - od příkazu k najetí do zapálení kotle
- fáze druhá - od zapálení kotle do dosažení provozních parametrů výstupní páry a požadovaného cílového výkonu kotle

Ve fázi první jsou zahrnuty veškeré kontroly zařízení před najetím a přípravné manipulace na zařízeních technologií. V této fázi proběhne najíždění okruhu voda-pára, funkčního celku jedné elektronapáječky, dále najíždění okruhu vzduch-spaliny, najetí funkčních celků LJ, vzduchových a kouřových ventilátorů, příprava najetí okruhu palivo-produkty spalování, až po vlastní zapálení kotle. Výsledkem dokončení první fáze najíždění je splnění podmínek nutných pro zapálení, což představuje především zajištění průtoku napájecí vody přes EKO a výparník, prohřátí kovu výparníku, zajištění dostatečného přísunu spalovacího a chladícího vzduchu pro kotel a příslušná zařízení, zajištění podtlaku ve spalovací komoře, provětrání spalovací komory, prohřátí kovu Ljungströmů, prohřátí mlecí linky, zajištění připravenosti plynových hořáků pro provoz, zajištění připravenosti najížděcího expanderu NEX pro provoz.

Pro temperaci kotle otevírá obsluha propoj horkého vzduchu mezi VB tak, aby mohl být horký vzduch z nejbližšího provozovaného VB nasáván do MV dvou spodních ML najížděného VB. Vpuštěním tohoto vzduchu do vzduchovodu kotle v záloze (při otevřených klapkách OFA a klapkách sekundárního vzduchu na všech ML na 100 %) dochází k jeho temperaci - využívá se v zimních měsících nebo při vlhkém počasí. Při temperování kotle a otevření tras spalin do komína lze částečně zajistit tahem komína temperaci EO - zajištění dosažení nutných minimálních teplot spalin za EO pro jeho najetí v okamžiku najetí první ML. Před zapálením PSH nutno případnou temperaci zrušit.

Po najetí VV a POV kouřové ventilátory sají teplý vzduch z kotle (teplý vzduch pro temperaturaci kotle), přes pomoci POV vyhříváné LJ a přes EO. Cílem prohřívání EO je zajištění dosažení nutných minimálních teplot spalin za EO pro jeho najetí v okamžiku najetí první ML. Podmínka pro najetí zdrojů VN napětí je  $T_{\text{spalin za EO}}$  minimálně 80 °C. Teplota spalin za EO musí dosáhnout teploty limitní během doby provozu PSH. Před zapálením PSH nutno EO předeřhřát na  $T_{\text{spalin za EO}} > 15$  °C. Pomocí klapky recirkulace a POV prohřívát kov LJ na teplotu  $T_{\text{SP}} > 50$  °C (mez pro zapálení PSH je  $T_{\text{MIN}} = 45$  °C) - měřeno jako teplota spalin za LJ.

Fáze druhá se dále dělí do dvou oblastí - od zapálení plynových stabilizačních hořáků do fázování turbogenerátoru a od fázování do vyjetí na provozní parametry páry a požadovaný výkon bloku.

V oblasti do fázování je zahrnuto vlastní zapálení kotle, dokončení najetí okruhu palivo-produkty spalování najetím funkčního celku mlecí linky, dosažení parametrů páry a výkonu kotle pro fázování.

Zapálení kotle se provede pomocí některé ze skupin PSH, zpravidla nejbližší dále najížděné mlecí linky. Po zapálení se začínají organizovat zdroje tepla tak, aby byl zabezpečen požadavek vzrůstajícího tepelného příkonu do kotle. Hodnota tepelného příkonu je řízena až do dosažení nastaveného cílového výkonu, a to s ohledem na dovolené trendy teplot, tlaků a na prohřívání turbíny. V této fázi najíždění se průtok vody reguluje tak, aby hladina separované vody v najížděcích nádobách byla v regulovatelných mezích (průtok vody přes EKO je zadáván operátorem, regulován malou smyčkou). Energetickou rovnováhu mezi příkonem a odběrem tepla a současně vzrůst tlaku (počítaný podle poměru za EKO tak, aby v něm nedocházelo k varu) regulují VT a NT přepouštěcí stanice. Palivo (tepelný příkon) je řízeno tak, aby parní výkon volně vzrůstal, podle potřeby je možno růst příkonu tepla dočasně zastavit a umožnit turbíně prohřátí. Turbína se roztáčí, prohřívá a následuje přifázování generátoru.

Fáze druhá – B. od fázování do dosažení provozních parametrů výstupní páry a požadovaného cílového výkonu kotle

V oblasti po přifázování se opět uplatní požadavek na nárůst tepelného výkonu kotle, což představuje nárůst teplot, tlaku a průtoku páry. Nárůstu výkonu kotle se dosáhne pozvolným zvyšováním tepelného příkonu kotle. Během této části fáze dojde ke změně počátečního separátorového režimu na průtočný. Z hlediska hlavních regulací to znamená napájet více než původní minimální množství, a to s ohledem na průběh teploty a tlaku páry za výparníkem podle najížděcích křivek kotle.

Řazení tepelných zdrojů se řídí tepelným stavem systému s ohledem na najížděcí diagramy a jejich žádané hodnoty. Skokové hodnoty v začátku najíždění urychlují vývoj teplot v začátku najíždění a pozdější rovnoměrný růst tepelného příkonu má zajistit rovnoměrný růst teplot jako funkce příkonu tepla a vývoje tlaku, který je závislý především na teplotě napájecí vody za EKO. To platí jak při najíždění ze studeného stavu, tak i z teplého stavu, až na výjimky extrémně krátkých odstávek.

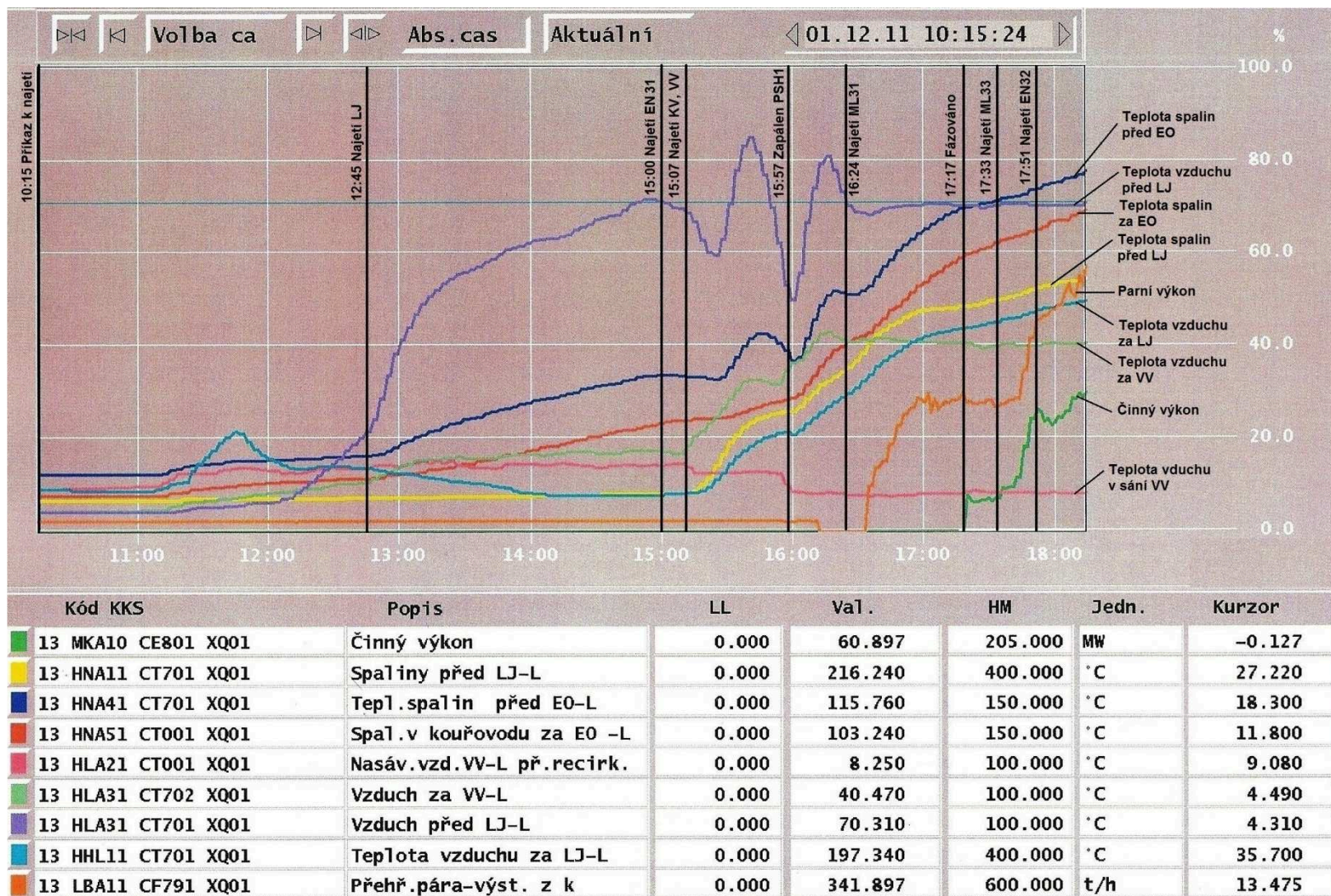
Stabilizace spalování se provádí v závislosti na tepelném výkonu kotle. Poklesne-li tepelný výkon kotle na méně než 50 % jmenovitého (stanoveného na cca. 300 t/h parního výkonu) je nutno spalovací proces stabilizovat. Při spalování paliva zhoršené jakosti se stabilizace musí zapojit při výkonu kotle vyšším.

Rychlost nárůstu teploty za výparníkem se musí regulovat ze začátku najíždění příkonem tepla do spalovací komory za konstantního průtoku vody. Po změně počátečního separátorového režimu na průtočný je teplota páry za výparníkem udržována pomocí postupného zvyšování množství napájecí vody 20 °C nad mezí sytosti, což zajišťuje velká smyčka regulace napájení.

## **4.2 Časový průběh teplot spalin a spalovacího vzduchu při najíždění v zimě**

Při popisu najíždění bloku sledujeme vliv přehřevu spalovacího vzduchu na teplotu jednotlivých částí za kotlem od příkazu k najetí po zprovoznění druhé mlecí linky. Tyto teploty jsou dány teploměry spalin před a za elektroodlučovači popílků. Uvedeny jsou také množství, teplota a tlak páry pro parní ohřívák vzduchu. Z hodnot teplot vzduchu v sání VV, za VV, před LJ a za LJ je vidět ohřev spalovacího vzduchu pomocí recirkulace, POV a LJ. Pomocí bilančních rovnic je zde vypočteno množství spalovacího vzduchu v recirkulaci při najetí první mlecí linky.

Pro návrh způsobu řízení teploty spalin za kotlem se musí znát průběh teplot spalin za kotlem v kritických provozních stavech posuzováno z hlediska nízkoteplotové koroze. Jedním z kritických provozních stavů je i najíždění v zimním období.



Obr.4.2-1 Obrazovka s trendy teplot při najíždění výrobního bloku

**Průběh najíždění z 1.12.2011:**

**10:15 příkaz k najetí výrobního bloku**

**Tab. 2.** *Sledované provozní hodnoty v průběhu najíždění*

<b>Najíždění VB</b>	<b>Výkon [MW]</b>	<b>Parní výkon [t/h]</b>	<b>Spaliny před LJ [°C]</b>	<b>Spaliny před EO [°C]</b>	<b>Spaliny za EO [°C]</b>
	0	0	27,22	18,3	11,8
<b>Vzduch v sání VV [°C]</b>	<b>Vzduch za VV [°C]</b>	<b>Vzduch před LJ [°C]</b>	<b>Vzduch za LJ [°C]</b>	<b>Průtok vzduchu před VV [m3/s]</b>	<b>RK recirkulace vzduchu [%]</b>
9	4,49	4,31	35,76	0	0
<b>Proud motoru VV [A]</b>	<b>Přední ložisko VV [°C]</b>	<b>Kondenzát z POV [t/h]</b>	<b>Tlak páry před POV [Mpa]</b>	<b>Teplota páry před POV [°C]</b>	<b>RV páry do POV [%]</b>
0	3,26	0	0	12,81	0

**12:45 najetí LJ**

**Tab. 3.** *Sledované provozní hodnoty v průběhu najíždění*

<b>Najíždění VB</b>	<b>Výkon [MW]</b>	<b>Parní výkon [t/h]</b>	<b>Spaliny před LJ [°C]</b>	<b>Spaliny před EO [°C]</b>	<b>Spaliny za EO [°C]</b>
	0	0	28,75	24,91	17,08
<b>Vzduch v sání VV [°C]</b>	<b>Vzduch za VV [°C]</b>	<b>Vzduch před LJ [°C]</b>	<b>Vzduch za LJ [°C]</b>	<b>Průtok vzduchu před VV [m3/s]</b>	<b>RK recirkulace vzduchu [%]</b>
13,52	11	23,2	54,16	3,4	0
<b>Proud motoru VV [A]</b>	<b>Přední ložisko VV [°C]</b>	<b>Kondenzát z POV [t/h]</b>	<b>Tlak páry před POV [Mpa]</b>	<b>Teplota páry před POV [°C]</b>	<b>RV páry do POV [%]</b>
0	3,72	0	0	155,82	10,05

Před najetím LJ byla otevřena klapka z propoje horkého vzduchu z vedlejšího bloku . Tím docházelo k temperaci kotle a částí za kotlem. Dále byl zprovozněn ohřev spalovacího vzduchu přes POV, jak je patrné ze zvýšení teploty spalovacího vzduchu před LJ z 4,3°C na 23,2°C.

**15:00 najetí EN31**

**Tab. 4.** *Sledované provozní hodnoty v průběhu najíždění*

<b>Najíždění VB</b>	<b>Výkon [MW]</b>	<b>Parní výkon [t/h]</b>	<b>Spaliny před LJ [°C]</b>	<b>Spaliny před EO [°C]</b>	<b>Spaliny za EO [°C]</b>
	0	0	32,48	50,38	34,76
<b>Vzduch v sání VV [°C]</b>	<b>Vzduch za VV [°C]</b>	<b>Vzduch před LJ [°C]</b>	<b>Vzduch za LJ [°C]</b>	<b>Průtok vzduchu před VV [m3/s]</b>	<b>RK recirkulace vzduchu [%]</b>
14,34	17,18	70,87	31,62	3,9	0
<b>Proud motoru VV [A]</b>	<b>Přední ložisko VV [°C]</b>	<b>Kondenzát z POV [t/h]</b>	<b>Tlak páry před POV [Mpa]</b>	<b>Teplota páry před POV [°C]</b>	<b>RV páry do POV [%]</b>
0	4,98	0	0,013	189,6	12,31



## 15:07 najetí KV a VV

**Tab. 5.** Sledované provozní hodnoty v průběhu najíždění

Najíždění VB	Výkon [MW]	Parní výkon [t/h]	Spaliny před LJ [°C]	Spaliny před EO [°C]	Spaliny za EO [°C]
	0	0	32,54	50,11	35,8
Vzduch v sání VV [°C]	Vzduch za VV [°C]	Vzduch před LJ [°C]	Vzduch za LJ [°C]	Průtok vzduchu před VV [m3/s]	RK recirkulace vzduchu [%]
14,49	16,82	69,07	31,62	2,79	0
Proud motoru VV [A]	Přední ložisko VV [°C]	Kondenzát z POV [t/h]	Tlak páry před POV [Mpa]	Teplota páry před POV [°C]	RV páry do POV [%]
0	5,06	1,33	0,012	195,63	10,55

## 15:57 zapálen PSH1

**Tab. 5.** Sledované provozní hodnoty v průběhu najíždění

Najíždění VB	Výkon [MW]	Parní výkon [t/h]	Spaliny před LJ [°C]	Spaliny před EO [°C]	Spaliny za EO [°C]
	0	0	102,98	56,03	42,28
Vzduch v sání VV [°C]	Vzduch za VV [°C]	Vzduch před LJ [°C]	Vzduch za LJ [°C]	Průtok vzduchu před VV [m3/s]	RK recirkulace vzduchu [%]
8,94	35,77	50,38	84,08	26,72	100
Proud motoru VV [A]	Přední ložisko VV [°C]	Kondenzát z POV [t/h]	Tlak páry před POV [Mpa]	Teplota páry před POV [°C]	RV páry do POV [%]
40,8	20,56	1,47	0,01	196,62	24,71

Před zapálením první skupiny plynových hořáků byla otevřena recirkulace spalovacího vzduchu. Ohřev spalovacího vzduchu probíhal tedy recirkulací i POV. Ohřev recirkulací je patrný na hodnotě teploty vzduchu za VV a to z 16,8°C na 35,7°C při zapálení PSH1. Jak je z tabulky vidět byla splněna podmínka pro zapálení plynových hořáků (teplota vzduchu za LJ>45°C).

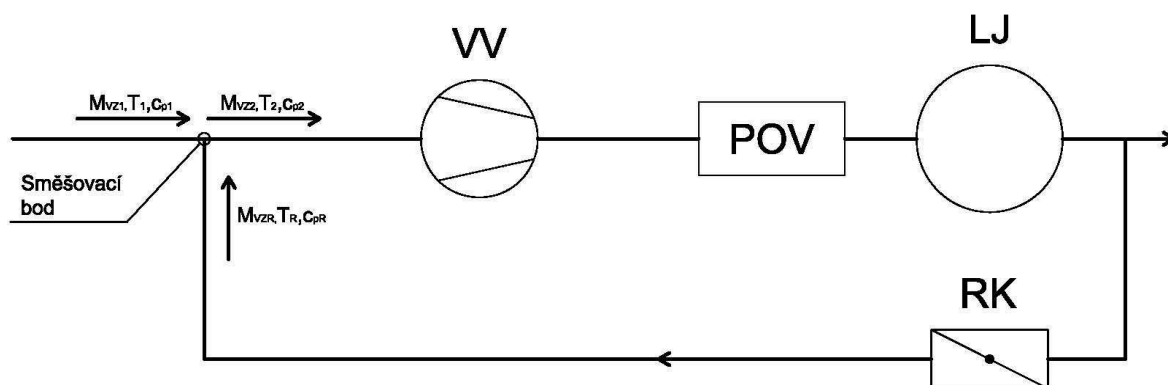
## 16:24 najetí ML31

**Tab. 6.** Sledované provozní hodnoty v průběhu najíždění

Najíždění VB	Výkon [MW]	Parní výkon [t/h]	Spaliny před LJ [°C]	Spaliny před EO [°C]	Spaliny za EO [°C]
	0	0	139,06	76,17	60,24
Vzduch v sání VV [°C]	Vzduch za VV [°C]	Vzduch před LJ [°C]	Vzduch za LJ [°C]	Průtok vzduchu před VV [m3/s]	RK recirkulace vzduchu [%]
7,96	40,71	70,78	117,78	30,81	79,31
Proud motoru VV [A]	Přední ložisko VV [°C]	Kondenzát z POV [t/h]	Tlak páry před POV [Mpa]	Teplota páry před POV [°C]	RV páry do POV [%]
39,99	22,52	3,9	0,01	204,45	21,17

Před najetím první mlecí linky je ohřev spalovacího vzduchu recirkulací na 40°C a ohřev přes POV o dalších 30°C tedy na 70°C (hodnoty zadány operátorem pomocí

regulátoru teploty spalovacího vzduchu před a za POV). Roste teplota palin před a za EO nutná pro zprovoznění VN zdrojů EO (min. 80°C).



**Obr. 4.2-2** Recirkulace spalovacího vzduchu

### Hmotnostní bilance směšovacího kusu recirkulace při najetí ML31

Směšovací rovnice:

$$M_{VZ1} + M_{VZR} = M_{VZ2} \quad (4-1)$$

$$M_{VZ1} \cdot c_{p1} \cdot T_1 + M_{VZR} \cdot c_{pR} \cdot T_R = M_{VZ2} \cdot c_{p2} \cdot (T_2 - \Delta T_{VV}) \quad (4-2)$$

$M_{VZ1}$  - množství vzduchu v sání [ $m^3/s$ ]

$M_{VZ2}$  - množství vzduchu po smíšení [ $m^3/s$ ]

$M_{VZR}$  - množství vzduchu recirkulace [ $m^3/s$ ]

$c_p$  - měrná tepelná kapacita vzduchu při tlaku 0,1 MPa [kJ/kg.K]

$T$  - teplota vzduchu [ $^{\circ}C$ ]

$\Delta T_{VV}$  - zvýšení teploty na VV [ $^{\circ}C$ ]

Teplota  $T_2$  je měřena až za VV. Pro výpočet tedy odečteme oteplení na VV o 5 $^{\circ}C$ .

$c_{p1}$  při teplotě  $T_1=7,96^{\circ}C=281,11$  K .....1,005 kJ/kg.K

$c_{p2}$  při teplotě  $T_2=35,71^{\circ}C=308,86$  K .....1,005 kJ/kg.K

$c_{pR}$  při teplotě  $T_R=117,78^{\circ}C=390,93$  K .....1,009 kJ/kg.K

$M_{VZ1}=30,81m^3/s=39,84kg/s$

$$39,84 \cdot 1,005 \cdot 281,11 + M_{VZR} \cdot 1,009 \cdot 390,93 = (39,84 + M_{VZR}) \cdot 1,005 \cdot 308,86$$

$$M_{VZR} = 13,22 \text{ kg/s}$$

17:17 přifázováno

**Tab. 7.** Sledované provozní hodnoty v průběhu najíždění

Najíždění VB	Výkon [MW]	Parní výkon [t/h]	Spaliny před LJ [°C]	Spaliny před EO [°C]	Spaliny za EO [°C]
	11,59	178,5	192,36	104,26	88,12
Vzduch v sání VV [°C]	Vzduch za VV [°C]	Vzduch před LJ [°C]	Vzduch za LJ [°C]	Průtok vzduchu před VV [m3/s]	RK recirkulace vzduchu [%]
8,35	40,23	70,01	173,62	30,05	58,52
Proud motoru VV [A]	Přední ložisko VV [°C]	Kondenzát z POV [t/h]	Tlak páry před POV [Mpa]	Teplota páry před POV [°C]	RV páry do POV [%]
38,67	26	4,64	0,01	202,35	21,17

17:33 najetí ML33

**Tab. 8.** Sledované provozní hodnoty v průběhu najíždění

Najíždění VB	Výkon [MW]	Parní výkon [t/h]	Spaliny před LJ [°C]	Spaliny před EO [°C]	Spaliny za EO [°C]
	17,32	161,6	199,19	106,57	92,84
Vzduch v sání VV [°C]	Vzduch za VV [°C]	Vzduch před LJ [°C]	Vzduch za LJ [°C]	Průtok vzduchu před VV [m3/s]	RK recirkulace vzduchu [%]
8,24	40,03	69,99	180,54	33,83	62,25
Proud motoru VV [A]	Přední ložisko VV [°C]	Kondenzát z POV [t/h]	Tlak páry před POV [Mpa]	Teplota páry před POV [°C]	RV páry do POV [%]
38,49	26,22	4,07	0,01	202,95	26,8

17:51 najetí EN32

**Tab. 9.** Sledované provozní hodnoty v průběhu najíždění

Najíždění VB	Výkon [MW]	Parní výkon [t/h]	Spaliny před LJ [°C]	Spaliny před EO [°C]	Spaliny za EO [°C]
	52,03	271,8	209,66	110,82	97,84
Vzduch v sání VV [°C]	Vzduch za VV [°C]	Vzduch před LJ [°C]	Vzduch za LJ [°C]	Průtok vzduchu před VV [m3/s]	RK recirkulace vzduchu [%]
8,11	40,05	69,81	189,42	34,64	63,26
Proud motoru VV [A]	Přední ložisko VV [°C]	Kondenzát z POV [t/h]	Tlak páry před POV [Mpa]	Teplota páry před POV [°C]	RV páry do POV [%]
38,49	26,5	5,37	0,01	201,18	26,32



#### 4.3 Časový průběh teplot spalin a spalovacího vzduchu při výkonu 130MW<sub>e</sub> v zimě s provedením zkoušky odstavení POV a recirkulace vzduchu

V rámci diplomové práce byla provedena zkouška odstavení předehřevu spalovacího vzduchu při stabilním výkonu 130 MW<sub>e</sub>. Nejprve byla odstavena recirkulace vzduchu při vyřazeném RV páry pro POV z režimu AUT, aby bylo možno sledovat jak moc ovlivňuje teplotu spalin za LJ recirkulace vzduchu. Poté byl postupně snižován výkon POV, až do jeho úplného odstavení. Blok byl poté provozován bez předehřevu spalovacího vzduchu. Zkouška měla za cíl ukázat, jak velký vliv má předehřev spalovacího vzduchu na teplotu spalin a možnosti regulace teploty spalin za kotlem.

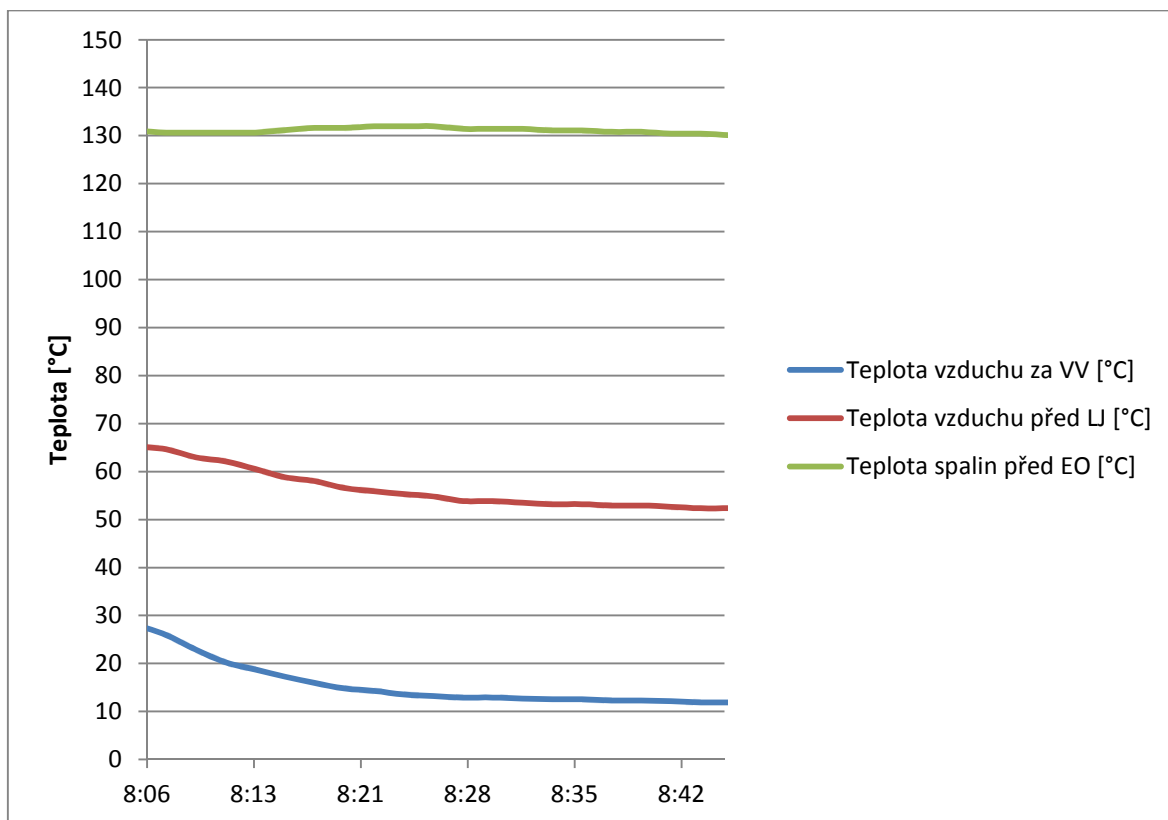
Průběh zkoušky z 21.1.2012 výrobní blok 3 EDĚ:

**8:06 postupné uzavření RK recirkulace spalovacího vzduchu**, RV pára do POV vyřazen z AUT (zůstává otevřen v poslední poloze a nereguluje na žádanou hodnotu teploty vzduchu za POV)

**Tab. 10.** Sledované provozní hodnoty v průběhu odstavení předehřevu vzduchu

130 MW a zkouška	Výkon [MW]		Spaliny před LJ [°C]	Spaliny před EO [°C]	Spaliny za EO [°C]
	130		279,95	131,03	127,6
Vzduch v sání VV [°C]	Vzduch za VV [°C]	Vzduch před LJ [°C]	Vzduch za LJ [°C]	Průtok vzduchu před VV [m3/s]	RK recirkulace vzduchu [%]
4,9	28,03	65,28	260	47,73	42,84
Proud motoru VV [A]	Přední ložisko VV [°C]	Kondenzát z POV [t/h]	Tlak páry před POV [Mpa]	Teplota páry před POV [°C]	RV páry do POV [%]
41,75	24,9	6,56	0,046	220	30,27

Po uzavření recirkulace spalovacího vzduchu je dle **obr. 4.3-1** patrný pokles teploty vzduchu za VV o 16,2°C a pokles teploty před LJ o 13°C za 40 minut. Na straně spalin není znát výrazný rozdíl teplot.



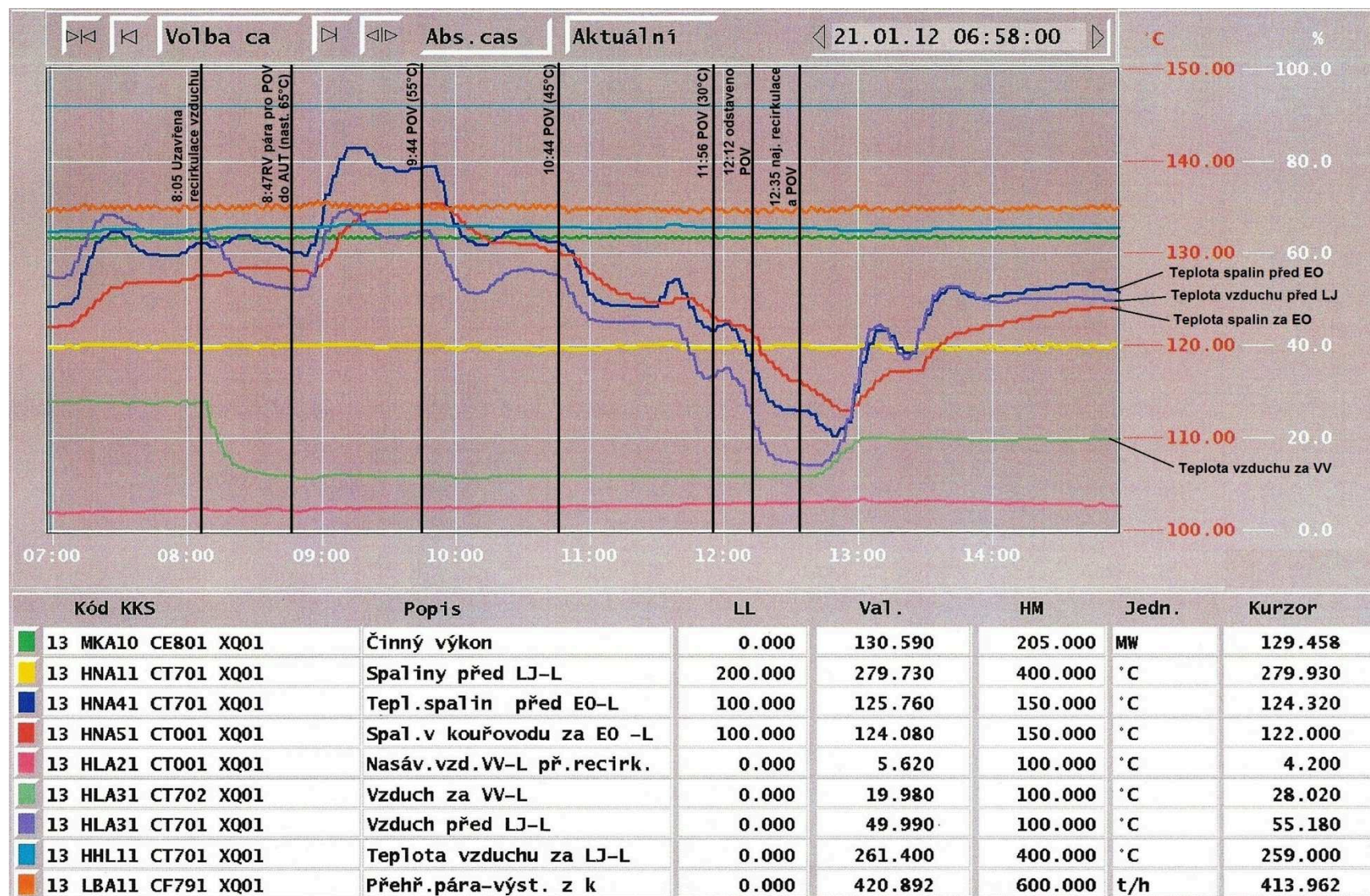
**Obr. 4.3-1** *Průběh teploty spalin a spalovacího vzduchu*

**8:47 RV pára do POV zařazen do AUT, žádaná hodnota teploty spalovacího vzduchu za POV nastavena na 65°C**

**Tab. 11.** *Sledované provozní hodnoty v průběhu odstavení přehřevu vzduchu*

130 MW a zkouška	Výkon [MW]		Spaliny před LJ [°C]	Spaliny před EO [°C]	Spaliny za EO [°C]
	130		280,02	130,11	128,04
Vzduch v sání VV [°C]	Vzduch za VV [°C]	Vzduch před LJ [°C]	Vzduch za LJ [°C]	Průtok vzduchu před VV [m3/s]	RK recirkulace vzduchu [%]
4,9	11,76	52,11	262,84	49,28	0
Proud motoru VV [A]	Přední ložisko VV [°C]	Kondenzát z POV [t/h]	Tlak páry před POV [Mpa]	Teplota páry před POV [°C]	RV páry do POV [%]
41,5	25,9	7,84	0,014	216,3	31,03

Po zařazení RV páry do POV do režimu AUT a nastavení teploty vzduchu za POV na 65°C nárůst teploty spalovacího vzduchu za POV na žádanou hodnotu. Růst teploty patrný i u spalin a to o 9°C před EO a 7°C za EO.



Obr. 4.3-2 Obrazovka s průběhy teplot při odstavení přehřevu spalovacího vzduchu

**9:44 žádaná hodnota teploty spalovacího vzduchu za POV nastavena na 55°C****Tab. 12.** Sledované provozní hodnoty v průběhu odstavení přehřevu vzduchu

130 MW a zkouška	Výkon [MW]		Spaliny před LJ [°C]	Spaliny před EO [°C]	Spaliny za EO [°C]
	130		280,2	139,35	135,2
Vzduch v sání VV [°C]	Vzduch za VV [°C]	Vzduch před LJ [°C]	Vzduch za LJ [°C]	Průtok vzduchu před VV [m3/s]	RK recirkulace vzduchu [%]
5,2	12,14	64,62	264,48	48,57	0
Proud motoru VV [A]	Přední ložisko VV [°C]	Kondenzát z POV [t/h]	Tlak páry před POV [Mpa]	Teplota páry před POV [°C]	RV páry do POV [%]
41,22	25,34	9,49	0,138	233,16	42,69

**10:44 žádaná hodnota teploty spalovacího vzduchu za POV nastavena na 45°C****Tab. 13.** Sledované provozní hodnoty v průběhu odstavení přehřevu vzduchu

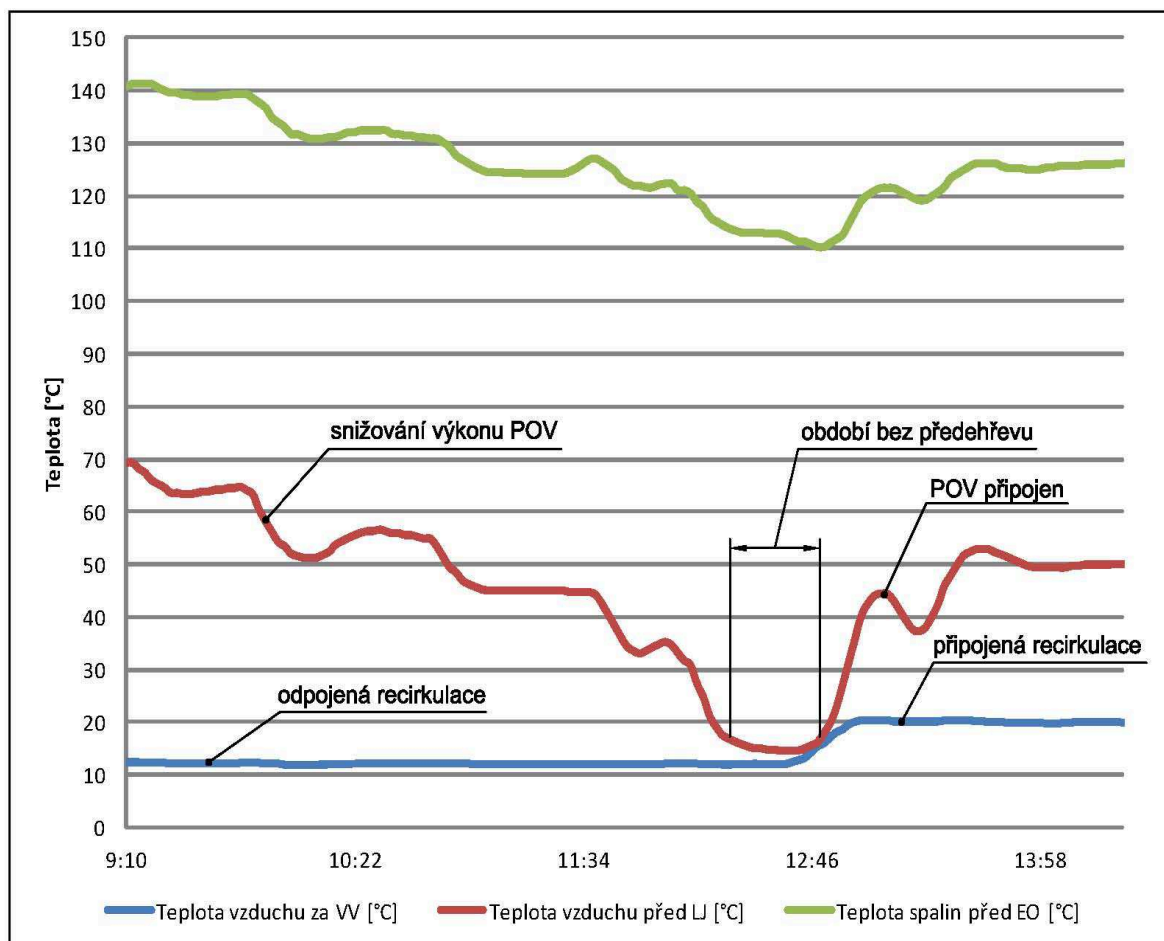
130 MW a zkouška	Výkon [MW]		Spaliny před LJ [°C]	Spaliny před EO [°C]	Spaliny za EO [°C]
	130		278,88	131,16	130,2
Vzduch v sání VV [°C]	Vzduch za VV [°C]	Vzduch před LJ [°C]	Vzduch za LJ [°C]	Průtok vzduchu před VV [m3/s]	RK recirkulace vzduchu [%]
5,57	12,07	54,99	262,3	49,17	0
Proud motoru VV [A]	Přední ložisko VV [°C]	Kondenzát z POV [t/h]	Tlak páry před POV [Mpa]	Teplota páry před POV [°C]	RV páry do POV [%]
41,42	25,44	7,86	0,02	225,27	32,51

**11:56 žádaná hodnota teploty spalovacího vzduchu za POV nastavena na 30°C****Tab. 14.** Sledované provozní hodnoty v průběhu odstavení přehřevu vzduchu

130 MW a zkouška	Výkon [MW]		Spaliny před LJ [°C]	Spaliny před EO [°C]	Spaliny za EO [°C]
	130		279,91	121,71	123,12
Vzduch v sání VV [°C]	Vzduch za VV [°C]	Vzduch před LJ [°C]	Vzduch za LJ [°C]	Průtok vzduchu před VV [m3/s]	RK recirkulace vzduchu [%]
6,08	11,94	34,29	262,66	48,58	0
Proud motoru VV [A]	Přední ložisko VV [°C]	Kondenzát z POV [t/h]	Tlak páry před POV [Mpa]	Teplota páry před POV [°C]	RV páry do POV [%]
40,98	25,92	2,57	0,014	205,11	19,82

Postupným snižováním výkonu POV dochází k snížení teploty spalovacího vzduchu před LJ (viz obr. 4.3-3). Po odstavení POV dochází už jen k částečnému ohřátí spalovacího vzduchu na VV o 6°C. Snížením teploty přehřevu o 50°C dochází ke snížení teploty spalin za kotlem před EO o 26,37°C a za EO o 19,4°C.





**Obr. 4.3-3** *Průběh teploty spalín a spalovacího vzduchu*

**12:12 odstaveno POV (uzavřen RV pára do POV)**

**Tab. 15.** *Sledované provozní hodnoty v průběhu odstavení předehřevu vzduchu*

130 MW a zkouška	Výkon [MW]		Spaliny před LJ [°C]	Spaliny před EO [°C]	Spaliny za EO [°C]
	130		279,95	118	120,88
Vzduch v sání VV [°C]	Vzduch za VV [°C]	Vzduch před LJ [°C]	Vzduch za LJ [°C]	Průtok vzduchu před VV [m <sup>3</sup> /s]	RK recirkulace vzduchu [%]
6,17	11,95	24,8	262,3	48,15	0
Proud motoru VV [A]	Přední ložisko VV [°C]	Kondenzát z POV [t/h]	Tlak páry před POV [Mpa]	Teplota páry před POV [°C]	RV páry do POV [%]
40,98	26,02	1,9	0	197,67	0

## 12:35 zprovozněna recirkulace spalovacího vzduchu a POV

**Tab. 16.** Sledované provozní hodnoty v průběhu odstavení přehřevu vzduchu

130 MW a zkouška	Výkon [MW]		Spaliny před LJ [°C]	Spaliny před EO [°C]	Spaliny za EO [°C]
	130		280,12	112,98	115,8
Vzduch v sání VV [°C]	Vzduch za VV [°C]	Vzduch před LJ [°C]	Vzduch za LJ [°C]	Průtok vzduchu před VV [m3/s]	RK recirkulace vzduchu [%]
6,44	12,02	14,58	262,02	48,58	8,71
Proud motoru VV [A]	Přední ložisko VV [°C]	Kondenzát z POV [t/h]	Tlak páry před POV [Mpa]	Teplota páry před POV [°C]	RV páry do POV [%]
40,98	26,22	2,37	0,01	179,76	7,14

Po zprovoznění přehřevu spalovacího vzduchu recirkulací a POV lze pozorovat pozvolný nárůst teploty spalin za kotlem, až na původní teploty před zkouškou. K vyrovnaní teplot dochází přibližně za 2 hodiny od zprovoznění přehřevu.

### 4.4 Teplota spalin a spalovacího vzduchu při výkonu 200MW v zimě

Pro porovnání teplot spalin a spalovacího vzduchu uvedena tabulka při výkonu 200 MW<sub>e</sub>. Zde vidíme značný nárůst teploty spalin před EO na 136,83°C. Vzhledem k tomu, že se snažíme držet teplotu za kotlem na 120°C, mohla by úprava regulace přehřevu spalovacího vzduchu dle teploty spalin za kotlem zvýšit účinnost bloku. Tedy ušetřit páru pro POV nebo snížit množství recirkulovaného vzduchu a tím i příkon ventilátoru.

**Tab. 16.** Sledované provozní hodnoty při jmenovitém výkonu

200 MW	Výkon [MW]		Spaliny před LJ [°C]	Spaliny před EO [°C]	Spaliny za EO [°C]
	200		312,66	136,83	130,8
Vzduch v sání VV [°C]	Vzduch za VV [°C]	Vzduch před LJ [°C]	Vzduch za LJ [°C]	Průtok vzduchu před VV [m3/s]	RK recirkulace vzduchu [%]
8,48	33,02	69,53	276,08	74,67	43,52
Proud motoru VV [A]	Přední ložisko VV [°C]	Kondenzát z POV [t/h]	Tlak páry před POV [Mpa]	Teplota páry před POV [°C]	RV páry do POV [%]
63,96	28,56	15,3	0,145	227,1	47,89

### Hmotnostní bilance směšovacího kusu recirkulace při 200 MW<sub>e</sub>

Směšovací rovnice (4-1) a (4-2):

$$M_{VZ1} + M_{VZR} = M_{VZ2}$$

$$M_{VZ1} \cdot c_{p1} \cdot T_1 + M_{VZR} \cdot c_{pR} \cdot T_R = M_{VZ2} \cdot c_{p2} \cdot (T_2 - \Delta T_{VV})$$

$M_{VZ1}$  - množství vzduchu v sání [m<sup>3</sup>/s]

$M_{VZ2}$  - množství vzduchu po smíšení [m<sup>3</sup>/s]

$M_{VZR}$  - množství vzduchu recirkulace [m<sup>3</sup>/s]

$c_p$  - měrná tepelná kapacita vzduchu při tlaku 0,1 MPa [kJ/kg.K]

$T$  - teplota vzduchu [°C]

$\Delta T_{VV}$  - zvýšení teploty na VV [°C]

Teplota  $T_2$  je měřena až za VV. Pro výpočet tedy odečteme oteplení na VV o 5°C.

$c_{p1}$  při teplotě  $T_1=8,48^\circ\text{C}=281,63\text{ K}$  .....1,005 kJ/kg.K

$c_{p2}$  při teplotě  $T_2=28,02^\circ\text{C}=301,17\text{ K}$  .....1,005 kJ/kg.K

$c_{pR}$  při teplotě  $T_R=276,08^\circ\text{C}=549,23\text{ K}$  .....1,043 kJ/kg.K

$M_{VZ1}=74,67\text{ m}^3/\text{s}=96,55\text{ kg/s}$

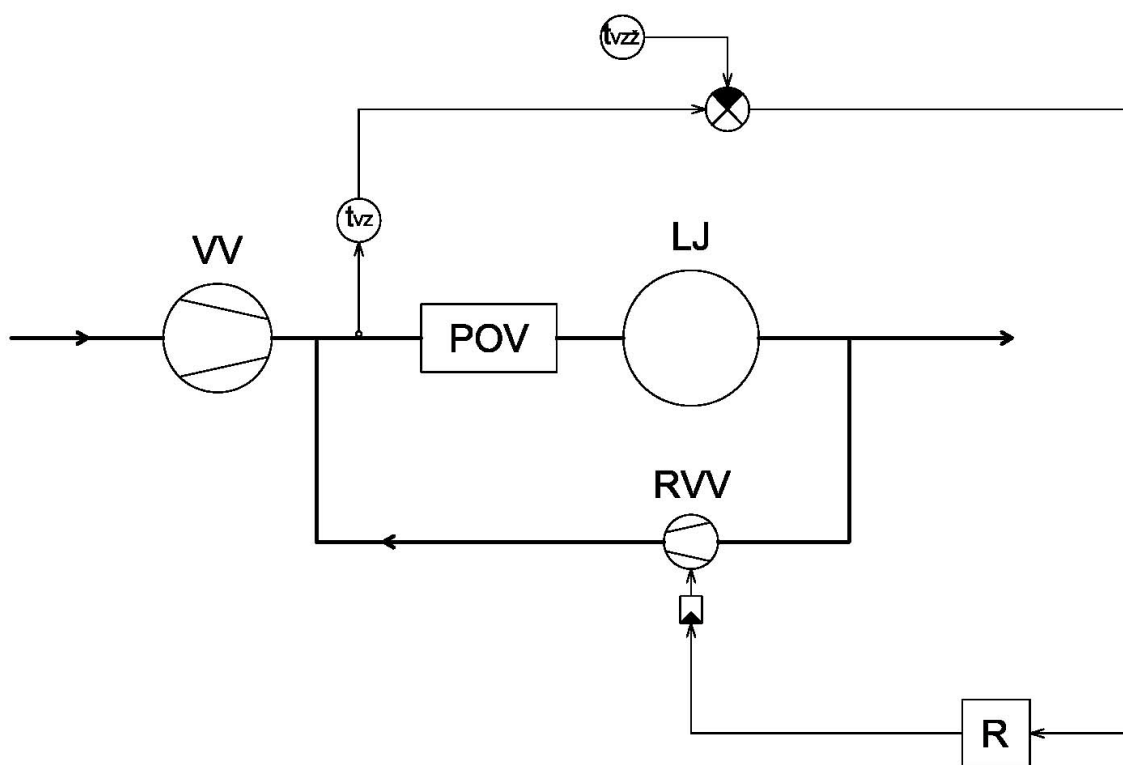
$$96,55 \cdot 1,005 \cdot 281,63 + M_{VZR} \cdot 1,043 \cdot 549,23 = (96,55 + M_{VZR}) \cdot 1,005 \cdot 301,17$$

$$M_{VZR} = 7,02\text{ kg/s}$$

## 5. Alternativní návrh pro řízení teploty spalin recirkulací vzduchu ke stávajícímu provedení

Recirkulace horkého vzduchu do nasávaného vede ke zvýšení jeho teploty po smíšení. Horký vzduch se odebírá z kanálu vystupujícího za ohřívákem LJ a zavádí se do sání VV. Po otevření recirkulační klapky dochází ke zvýšení průtoku a teploty vzduchu přes VV. Ventilátor odvádí více práce, má tedy větší příkon a musí být na to dimenzován. Jako alternativu lze recirkulovaný vzduch zavést do výtlaku VV. V tomto případě musí být použit samostatný recirkulační ventilátor RVV. Množství recirkulovaného vzduchu pro dosažení požadované teploty spalovacího vzduchu před POV je regulováno otáčkami RVV.

Volba uvedeného alternativního systému je záležitostí optimalizace systému recirkulace horkého vzduchu. Alternativní provedení se bude lišit pořizovacími náklady na ventilátory VV a RVV a jejich spotřebou elektrické energie.

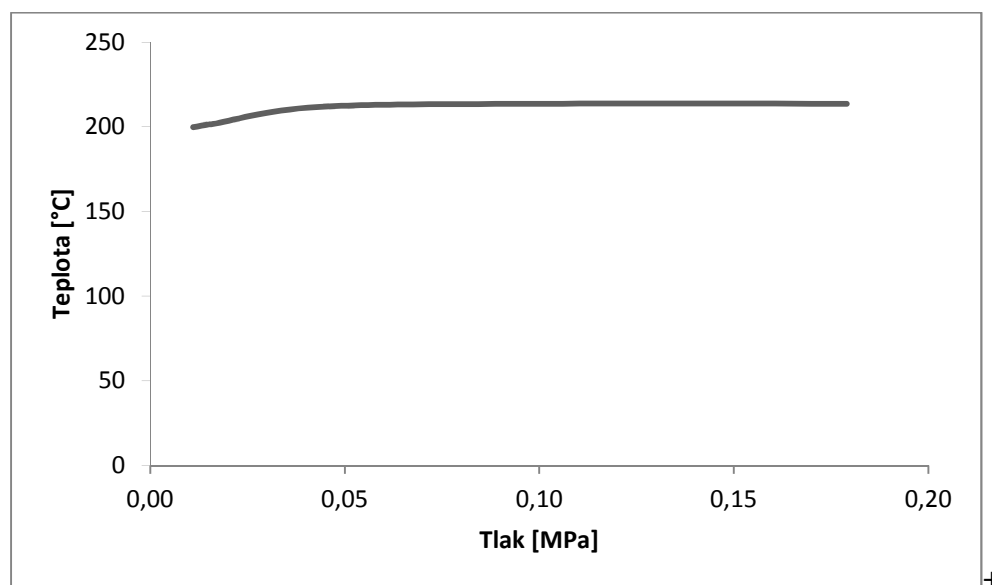


**Obr. 5-1** Regulace přehřevu vzduchu recirkulací pomocí recirkulačního ventilátoru



## 6. Alternativní návrh pro řízení teploty spalin předehřevem vzduchu v POV ke stávajícímu provedení

Při volbě alternativního návrhu řízení teploty spalin předehřevem vzduchu v POV chceme dosáhnout většího regulačního rozsahu než je původní. U současného provedení se teplota páry při změně tlaku pomocí RV na vstupu do POV mění jen minimálně (viz obr. 6-1).

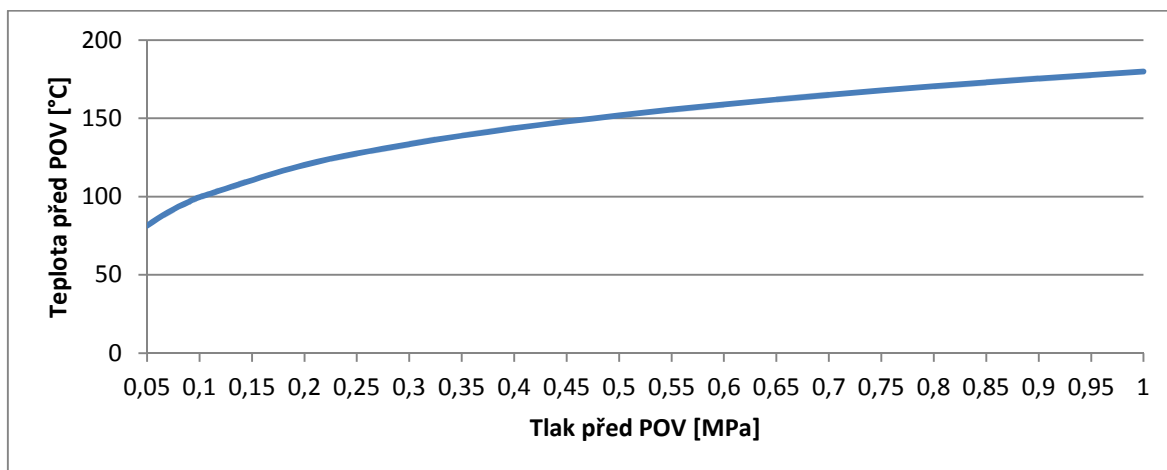


**Obr. 6-1** Závislost teploty na tlaku před POV

Při snížení tlaku páry v POV se sníží teplota kondenzace a tím i tepelný výkon POV.

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta t_s \quad [\text{W}] \quad (6-1)$$

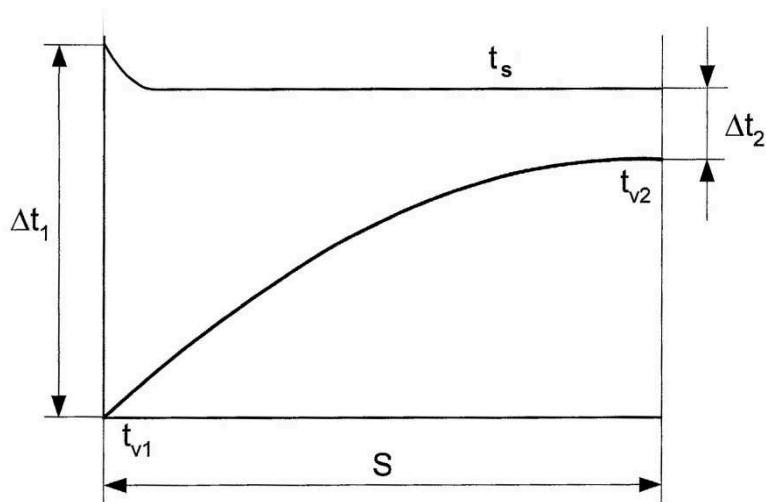
Pro rozsah regulace je však důležitá velikost změny středního logaritmického teplotního spádu v závislosti na tlaku před POV. Průběh saturační teploty je vidět na obr. 6-2. Budeme-li uvažovat při regulaci změnu tlaku před POV v rozsahu 0,05 až 0,3 MPa.



**Obr. 6-2** Průběh saturační teploty

Tepelný výkon regulujeme pouze změnou logaritmického spádu  $\Delta t_s$ , protože pro tento případ součinitel prostupu tepla  $k$  i velikost teplosměnné plochy  $S$  jsou stejné. Logaritmický teplotní spád určíme dle rovnice:

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6-2)$$



**Obr. 6-3** *Průběh teplot v POV*

Pro maximální tlak páry před POV 0,2MPa (saturační teplota 120,21 $^{\circ}\text{C}$ ) při ohřevu vzduchu z 40 $^{\circ}\text{C}$  na 70 $^{\circ}\text{C}$  je:

$$\Delta t_1 = 120,21 - 40 = 80,21 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

$$\Delta t_2 = 120,21 - 70 = 50,21 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

$$\Delta t_s = \frac{80,21 - 50,21}{\ln \frac{80,21}{50,21}}$$

$$\Delta t_s = \mathbf{64,04 \text{ } [^{\circ}\text{C}]}$$

Pro minimální tlak páry před 0,1MPa (saturační teplota 99,606 $^{\circ}\text{C}$ ) při ohřevu vzduchu z 40 $^{\circ}\text{C}$  na 70 $^{\circ}\text{C}$  je:

$$\Delta t_1 = 99,606 - 40 = 59,606 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

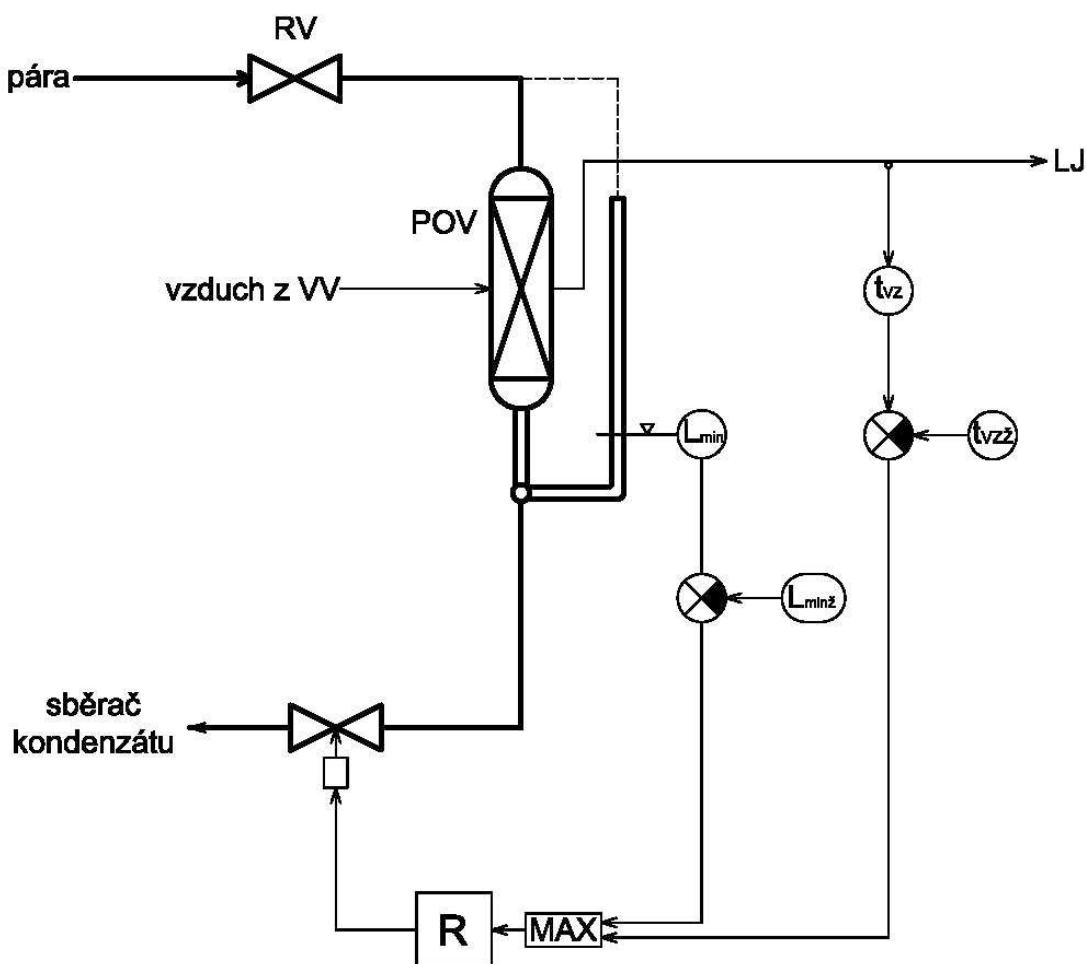
$$\Delta t_2 = 99,606 - 70 = 29,606 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

$$\Delta t_s = \frac{59,606 - 29,606}{\ln \frac{59,606}{29,606}}$$

$$\Delta t_s = \mathbf{42,87 \text{ } [^{\circ}\text{C}]}$$

Regulační rozsah výkonu výměníku při ohřevu vzduchu z 40°C na 70°C je 67-100%, ale je dosažen na úkor škrcení páry o větším tlaku - zbytečně se snižuje výroba elektřiny. Pokud chceme zvětšit regulační rozsah musíme provést následující úpravu.

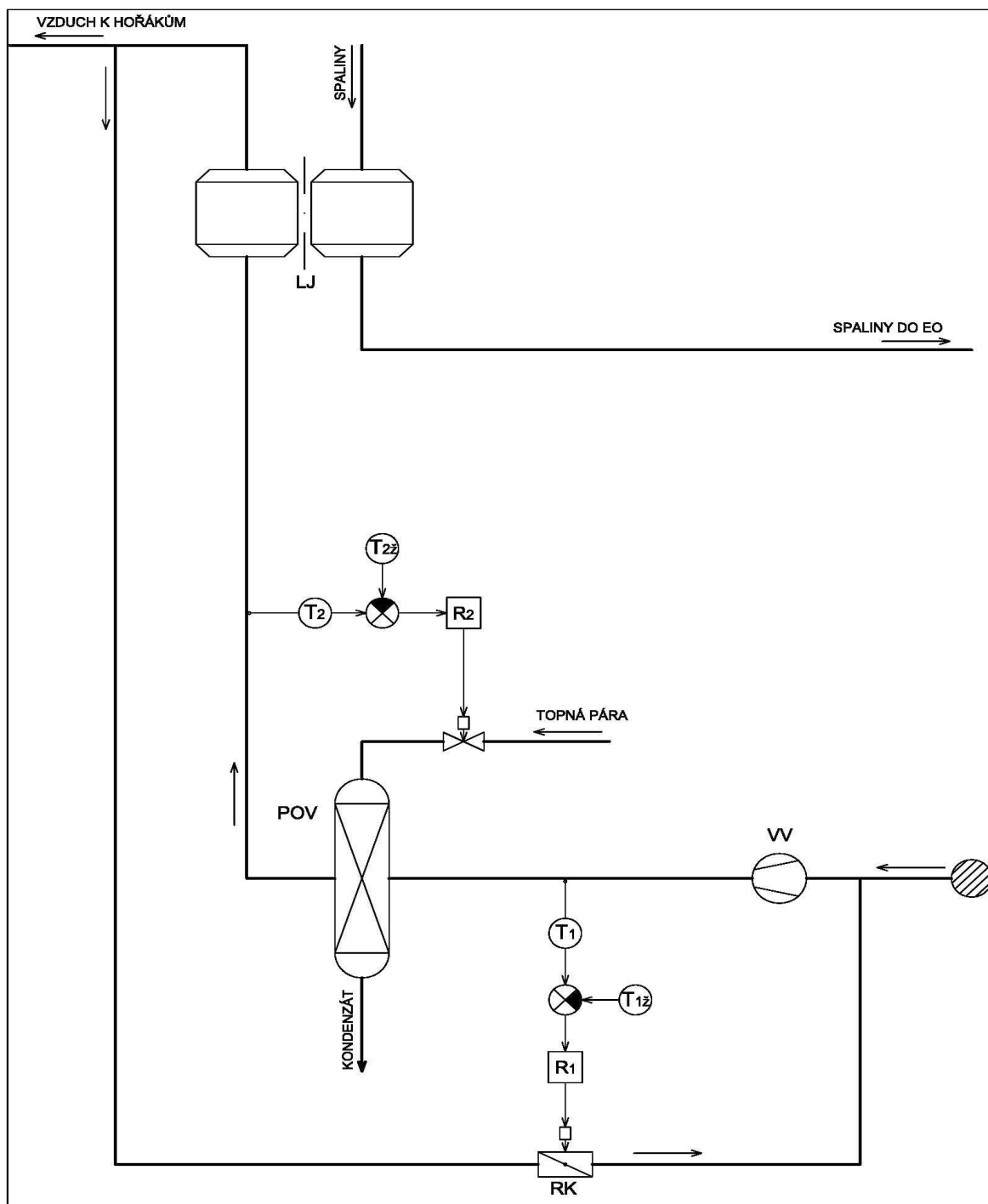
Jiné provedení POV spočívá v možnosti jeho zaplavení kondenzátem, pokud jeho konstrukce umožní při změně skupenství spolehlivý provoz. Akčním orgánem regulace je regulační ventil RVK odvodu kondenzátu. Při větším tepelném výkonu POV než je potřebný se množství odváděného kondenzátu zmenší, takže vzniklým přebytkem tvořícího se kondenzátu se část trubek teplosměnné plochy POV zahltí a zmenší se tak velikost kondenzační plochy POV a tím i množství zkondenzované páry. Regulovanou veličinou nadále zůstává teplota vzduchu před LJ (za POV), kterou zadává operátor kotle s ohledem na teplotu spalín za kotlem. Pro nastavení vhodného tlaku při změně provozních podmínek (např. při najíždění) bude nadále sloužit RV v přívodu páry do POV.



**Obr. 6-4** Regulace teploty vzduchu před LJ odvodem kondenzátu z POV

## 7. Návrh řízení optimální teploty spalin z hlediska účinnosti kotle a ochrany kotle a partie za kotlem před NT korozí

Pro optimální řízení teploty spalin za kotlem z ohledem na rosný bod navrhuji 3 alternativy regulace přehřevu spalovacího vzduchu. V první alternativě je akčním členem regulace regulační klapka recirkulace spalovacího vzduchu. V druhé alternativě je regulačním členem regulační ventil v přívodu páry na POV. Třetí alternativa využívá možnost kontinuálního měření rosného bodu spalin. Pro názornost je na obr. 7-1 zobrazena původní regulace (popis v kapitolách 3.1 a 3.2).



Obr.7-1 Původní regulace přehřevu spalovacího vzduchu

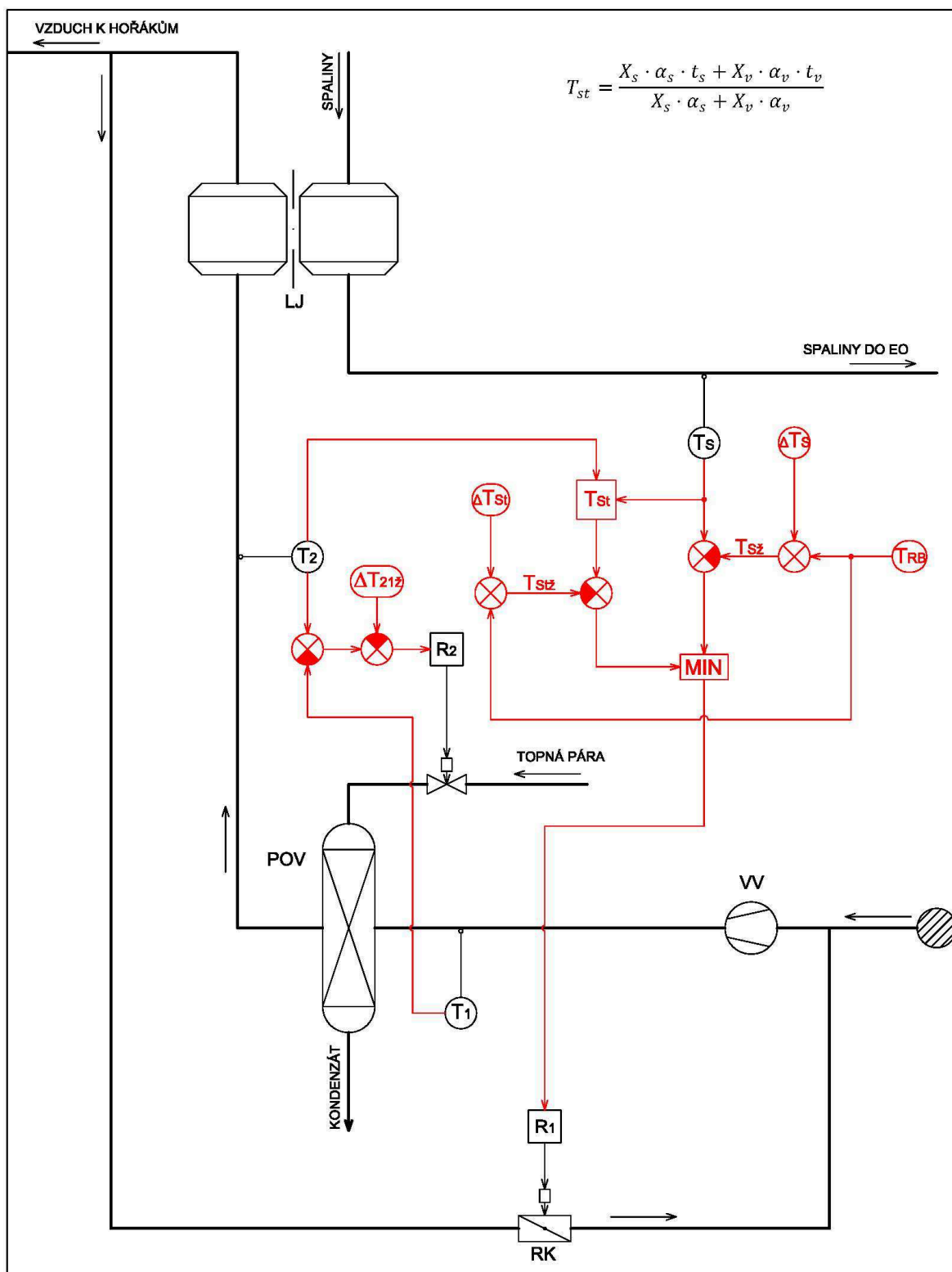
## 7.1 Optimální regulace teploty spalin recirkulací horkého vzduchu

Při tomto návrhu regulujeme podle nižší hodnoty z výstupní teplotu spalin za LJ nebo teploty plechů na studeném konci LJ a to pomocí předehřevu spalovacího vzduchu recirkulací horkého vzduchu do sání VV. Vycházíme z měřených teplot spalin před EO  $T_s$  a teploty vzduchu před LJ  $T_2$ . Z těchto teplot počítáme teplotu  $T_{st}$  plechů na studeném konci LJ (2-2).

$$T_{st} = \frac{X_s \cdot \alpha_s \cdot t_s + X_v \cdot \alpha_v \cdot t_v}{X_s \cdot \alpha_s + X_v \cdot \alpha_v}$$

Nastavíme nebo změříme teplotu rosného bodu  $T_{RB}$ , přičteme  $\Delta T_{st}=5^{\circ}\text{C}$  zohledňující ochranu zařízení před korozí a dostaneme žádanou teplotu stěny LJ  $T_{stž}$ . K teplotě rosného bodu  $T_{RB}$  přičteme  $\Delta T_s=30^{\circ}\text{C}$ , tedy teplotu potřebnou pro udržení teploty nad rosným bodem v dalších částech za kotlem a odsíření. Dostaneme žádanou teplotu spalin  $T_{sž}$ . Výběr minima vybere menší hodnotu a dle této hodnoty regulátor  $R_1$  pomocí RK recirkulace vzduchu udržuje požadovanou teplotu předehřevu spalovacího vzduchu.

Regulátor  $R_2$  pak udržuje ohřátí vzduchu na POV na konstantní požadované hodnotě. Ohřátí vzduchu na POV  $\Delta T=T_2-T_1$  se udržuje konstantní na žádané hodnotě  $\Delta T_{21ž}$ . Žádanou hodnotu ohřevu  $\Delta T_{21ž}$  lze měnit v závislosti na výkonu kotle.



**Obr. 7.1-1** Optimální regulace teploty spalin recirkulací horkého vzduchu

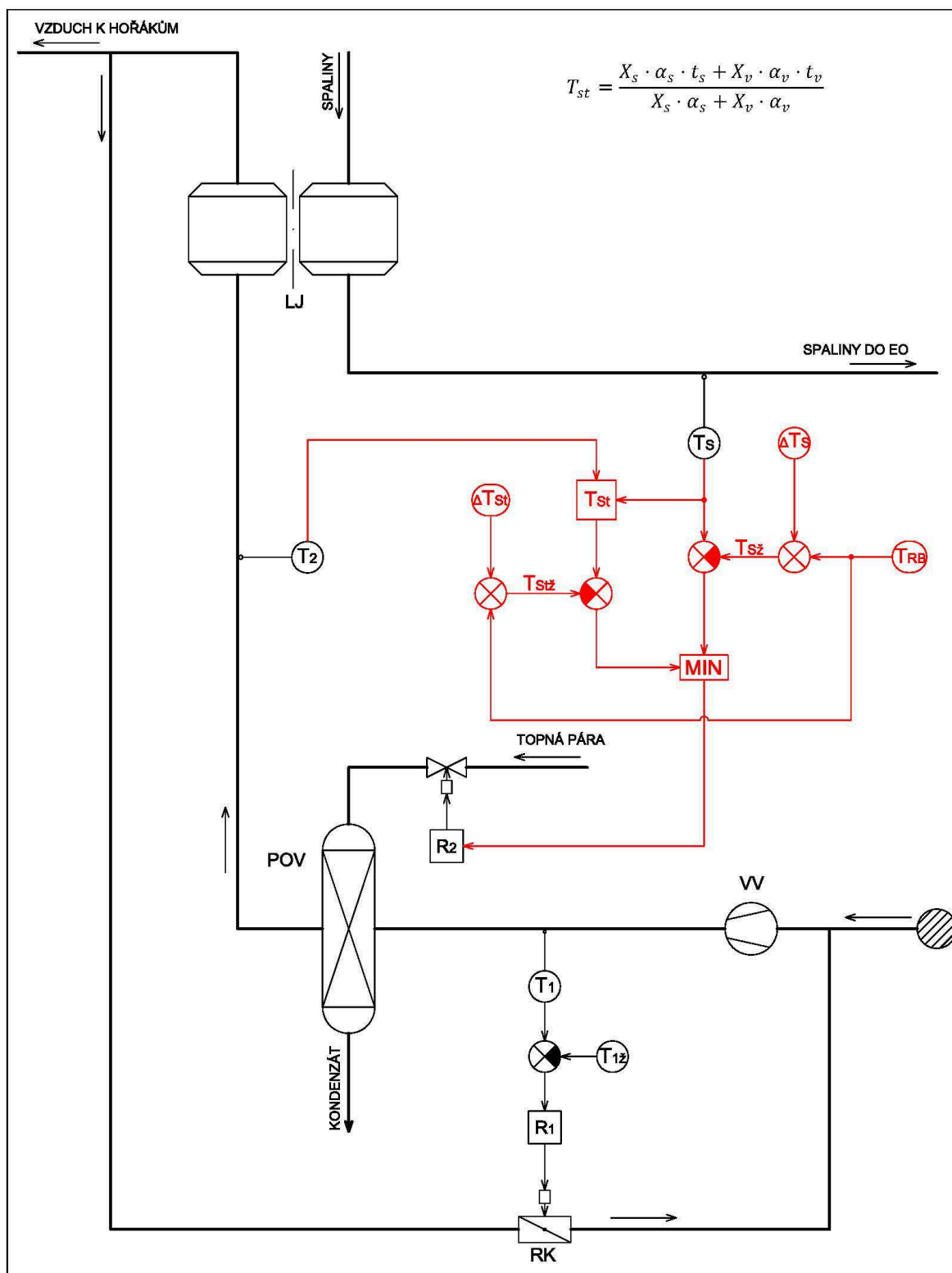
## 7.2 Optimální regulace teploty spalin předeřevem vzduchu na POV

Podobně jako v předchozím návrhu regulujeme podle nižší hodnoty z výstupní teplotu spalin za LJ nebo teploty plechů na studeném konci LJ, ale pomocí předeřevu spalovacího vzduchu na POV. Vycházíme z měřených teplot spalin před EO  $T_s$  a teploty vzduchu před LJ  $T_2$ . Z těchto teplot počítáme teplotu  $T_{st}$  plechů na studeném konci LJ. Teplotu  $T_{st}$  počítáme dle rovnice (2-2):

$$T_{st} = \frac{X_s \cdot \alpha_s \cdot t_s + X_v \cdot \alpha_v \cdot t_v}{X_s \cdot \alpha_s + X_v \cdot \alpha_v}$$

Nastavíme nebo změříme teplotu rosného bodu  $T_{RB}$ , přičteme  $\Delta T_{st}=5^{\circ}\text{C}$  zohledňující ochranu zařízení před korozi a dostaneme žádanou teplotu stěny LJ  $T_{stz}$ . K teplotě rosného bodu  $T_{RB}$  přičteme  $\Delta T_s=30^{\circ}\text{C}$ , tedy teplotu potřebnou pro udržení teploty nad rosným bodem v dalších částech za kotlem a odsíření. Dostaneme žádanou teplotu spalin  $T_{sz}$ . Výběr minima vybere menší hodnotu a dle této hodnoty regulátor  $R_2$  pomocí RV páry do POV udržuje požadovanou teplotu předeřevu spalovacího vzduchu.

Regulátor  $R_1$  pak udržuje ohřátí vzduchu pomocí recirkulace horkého vzduchu do sání VV na konstantní žádané hodnotě. Žádanou hodnotu ohřevu  $\Delta T_{1z}$  lze měnit v závislosti na výkonu kotle.



**Obr. 7.2-1** Optimální regulace teploty spalin předehřevem vzduchu na POV



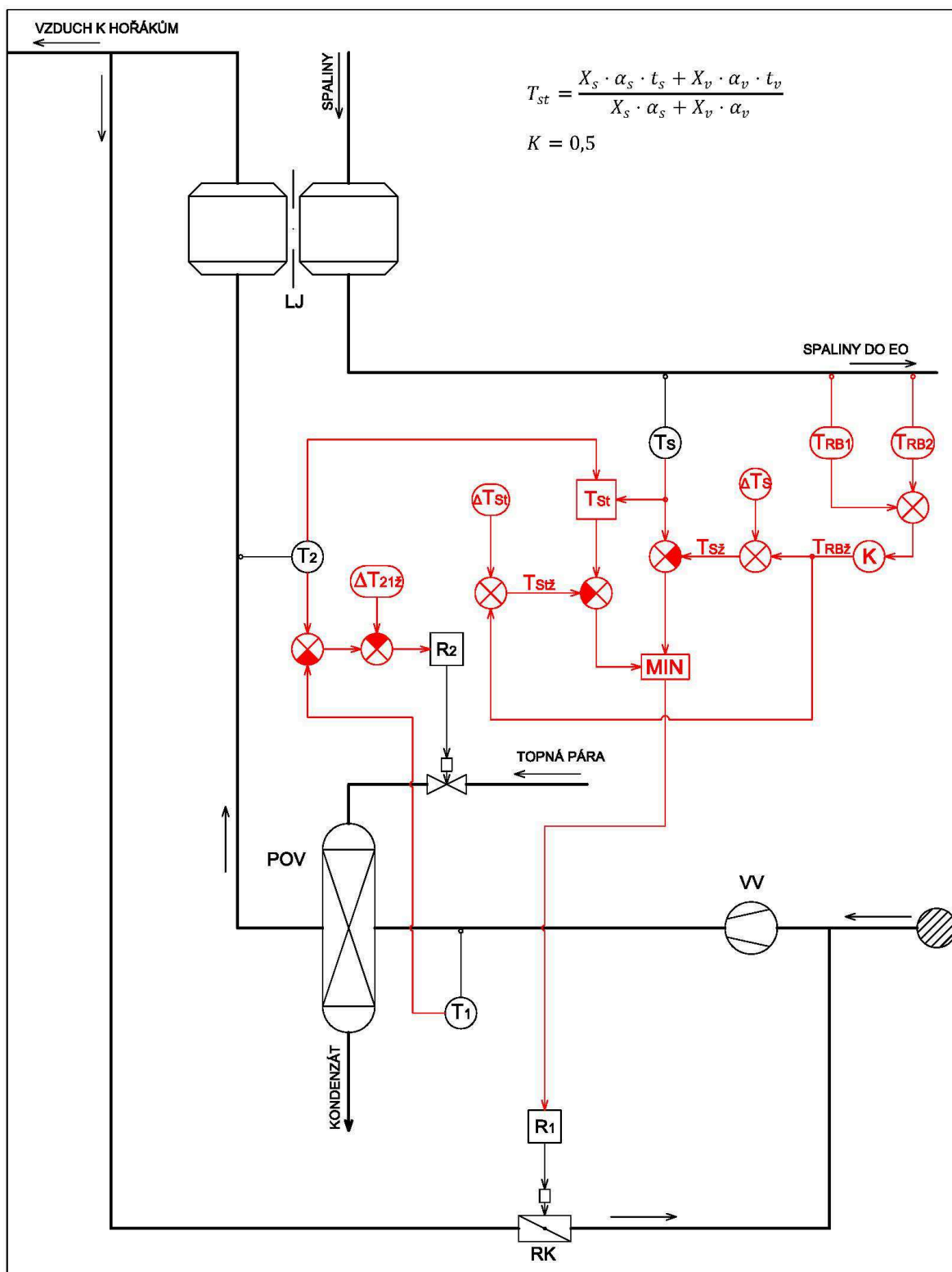
### 7.3 Optimální regulace teploty spalin recirkulací horkého vzduchu podle aktuální hodnoty rosného bodu

Tento návrh využívá možnost kontinuálního měření rosného bodu popsaného v kapitole 2.3. Protože na straně spalin a na straně vzduchu jsou potrubní kanály v Dětmovicích provedeny jako dvouvětвовé, tak této skutečnosti využijeme k přesnějšímu stanovení okamžitého rosného bodu. Do každé potrubní větve spalin umístíme mezi LJ a EO dva měřicí přístroje rosného bodu. Budeme tedy měřit 4 hodnoty (2 kanály x 2 měřicí přístroje). V návrhu regulace tedy sečteme naměřené hodnoty rosného bodu  $T_{RB1}$  a  $T_{RB2}$  a vynásobíme konstantou  $K=0,5$  a dostaneme žádanou teplotu rosného bodu  $T_{RBž}$ .

V další části návrhu je postup stejný jako v kapitole 7.1. Tedy regulujeme podle nižší hodnoty z výstupní teploty spalin za LJ nebo teploty plechů na studeném konci LJ a to pomocí předehřevu spalovacího vzduchu recirkulací horkého vzduchu do sání VV. Vycházíme z měřených teplot spalin před EO  $T_s$  a teploty vzduchu před LJ  $T_2$ . Z těchto teplot počítáme teplotu  $T_{st}$  plechů na studeném konci LJ (dle rovnice 2-2).

K žádané teplotě rosného bodu  $T_{RBž}$  přičteme  $\Delta T_{st}=5^{\circ}\text{C}$  zohledňující ochranu zařízení před korozí a dostaneme žádanou teplotu stěny LJ  $T_{sž}$ . K teplotě rosného bodu  $T_{RB}$  přičteme  $\Delta T_s=30^{\circ}\text{C}$ , tedy teplotu potřebnou pro udržení teploty nad rosným bodem v dalších částech za kotlem a odsíření. Dostaneme žádanou teplotu spalin  $T_{sž}$ . Výběr minima vybere menší hodnotu a dle této hodnoty regulátor  $R_1$  pomocí RK recirkulace vzduchu udržuje požadovanou teplotu předehřevu spalovacího vzduchu.

Regulátor  $R_2$  pak udržuje ohřátí vzduchu na POV na konstantní požadované hodnotě. Ohřátí vzduchu na POV  $\Delta T=T_2-T_1$  se udržuje konstantní na žádané hodnotě  $\Delta T_{21ž}$ . Žádanou hodnotu ohřevu  $\Delta T_{21ž}$  lze měnit v závislosti na výkonu kotle.



**Obr. 7.3-1** Optimální regulace teploty spalin recirkulací horkého vzduchu podle aktuální hodnoty rosného bodu

#### **7.4 Optimální regulace teploty spalin předehřevem vzduchu na POV podle aktuální hodnoty rosného bodu**

Návrh je stejný jako v kapitole 7.2. Změna je pouze u hodnoty  $T_{RB}$ , není zadána, ale změřená pomocí kontinuálního měření rosného bodu. Měření je provedeno 2x v jedné potrubní větvi spalin a změřené hodnoty  $T_{RB1}$  a  $T_{RB2}$  sečteme a vynásobíme  $K=0,5$ . Dostaneme žádanou hodnotu rosného bodu  $T_{RBž}$  (stejně jako v kapitole 7.3), kterou použijeme v regulaci místo hodnoty  $T_{RB}$ .

## 8. Závěr

Cílem diplomové práce bylo posouzení provozu kotle v Elektrárně Dětmarovice z hlediska nízkoteplotní koroze. Podstata práce spočívala v řízení podmínek na kotli podle hodnoty rosného bodu. Na kotli jsou dva regulační obvody předehřevu spalovacího vzduchu recirkulací a předehřev na POV (stávající stav viz kapitola 3.1 a 3.2). I když po celou dobu existence Elektrárny Dětmarovice se daří udržovat provoz kotle nad rosným bodem a s korozí na kotli a elektrodlučovačích nejsou žádné zásadní problémy, je zde otázka, jestli by se nedal provoz optimalizovat s cílem teplotu za kotlem snížit a zvýšit tak celkovou účinnost. K tomu směřovala diplomová práce.

Nedostatkem současné regulace je, že reguluje teplotu předehřevu spalovacího vzduchu, což je dnes u moderních zdrojů překonané, a navíc na stále konstantní hodnotu. Teplota spalovacího vzduchu má být pouze nástrojem pro řízení tohoto procesu, ale správně se musí regulovat teplota spalín a současně teplota stěny. Alternativní návrhy regulace jsou zaměřeny na regulaci teploty stěny z hlediska ochrany kotle a regulaci teploty spalín z hlediska ochrany partií za kotlem. Alternativní regulace vybírá nižší z těchto hodnot a podle té reguluje předehřev spalovacího vzduchu. Výhoda spočívá v tom, že systém sleduje nižší hodnotu pro regulaci, oproti současné verzi, kde je hodnota teploty vzduchu a tedy i spalín fixně nastavena. Jak je prokázáno dle měření teploty spalín a spalovacího vzduchu při různých provozních stavech při vyřazeném předehřevu (viz kapitoly 4.2, 4.3 a 4.4), tak s výkonem kotle se teplota spalín mění. Nově navržená regulace umí na tyto změny reagovat a to i bez zásahu operátora kotle.

Optimální regulace vychází ze zadané hodnoty rosného bodu. Tato hodnota se ale může měnit dle obsahu  $\text{SO}_3$ , s výkonem, palivem atd. Dnes, kdy již máme k dispozici kontinuální měření rosného bodu (viz kapitola 2.3), je v práci provedena alternativa i s použitím toho přímého měření. Kotel se tedy prostřednictvím regulace přizpůsobuje aktuální hodnotě rosného bodu. Lze očekávat, že výsledkem budou nižší hodnoty teploty spalín v průběhu provozních režimů při dodržení podmínek spolehlivého provozu z titulu nízkoteplotní koroze a dojde tedy ke zvýšení účinnosti, z důvodu poklesu komínové ztráty.

## 9. Seznam použité literatury

- [1] Ptoszek, M.: Místní provozní předpis kotel PG 650t/h, firemní podklady ČEZ a.s. Elektrárna Dětmarovice
- [2] Vilimec, L.: Řízení a regulace energetických zařízení. Skripta VŠB-TU, Ostrava 2008, ISBN 978-80-248-1853-5
- [3] Ibler, Z. a kolektiv: Technický průvodce energetika, 1. díl. Praha 2002 ISBN 80-7300-026-1
- [4] Možnosti snížení koroze v kouřovodu bloků a odsíření v Elektrárně Dětmarovice. Zpráva VŠB-TU Ostrava, Březen 2004
- [5] Sborník přednášek konference kotle a energetická zařízení. Brno, 19.-21.3.2012 ISSN 1804-6673
- [6] Pietroš, T.; Vilimec, L.; Skýba, J.: Výzkum technologie procesu a optimalizace konstrukce spalovacích pecí na komunální odpad, zajišťující zvýšení účinnosti transformace energie, 2A - 3TP1/087
- [7] Dlouhý, T.: Výpočty kotlů a spalínových výměníků, Praha, 2011 Vydavatelství ČVUT, ISBN 978-80-01-03757-7

## 10. Seznam příloh

- |           |  |
|-----------|--|
| Příloha A | Schéma optimální regulace teploty spalin recirkulací horkého vzduchu                                     |
| Příloha B | Schéma optimální regulace teploty spalin předehřevem vzduchu na POV                                      |
| Příloha C | Schéma optimální regulace teploty spalin recirkulací horkého vzduchu podle aktuální hodnoty rosného bodu |